

APLICAÇÃO DO DESIGNBUILDER À AVALIAÇÃO DE SOLUÇÕES DE AQUECIMENTO E ARREFECIMENTO DE EDIFÍCIOS PARA DIFERENTES ZONAS CLIMÁTICAS PORTUGUESAS

MANUEL FRANCISCO CARDOSO COELHO DA COSTA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professor Doutor Nuno Manuel Monteiro Ramos

JUNHO DE 2013

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2012/2013

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2012/2013 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais, Família e Amigos, pela amizade e sábios conselhos!

Investir em conhecimento rende sempre os melhores juros.

Benjamin Franklin

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Doutor Nuno Manuel Monteiro Ramos, por toda a ajuda, compreensão, incentivo, ideias e sugestões no desenvolvimento do trabalho e tempo disponibilizado para me ajudar em qualquer situação. Também gostaria de agradecer pela proposta do tema, pois nunca pensei que poderia adquirir tanto conhecimento com a realização deste trabalho.

Aos meus pais, por todos os valores transmitidos, pela confiança e apoio incondicional, pela presença sempre atenta e interessada em toda a minha vida académica.

À Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, pelo *software* disponibilizado, e sem o qual a realização deste trabalho não era possível.

Ao meu colega Daniel Rebelo pela ajuda incondicional, apoio académico e apoio moral.

Aos meus amigos Adalide Alves, Filipe Rodrigues, Gil Inácio, Marta Moreira, Miguel Lima, Pedro Morgado, por todo o apoio, incentivo, preocupação e ajuda ao longo deste semestre.

Obrigado a todos os amigos que não mencionei nestes parágrafos mas que de certa forma contribuíram com algum do seu tempo para a realização este trabalho. Obrigado!

RESUMO

Nos últimos anos tem aumentado a implementação de sistemas de climatização em edifícios residenciais, de modo a melhorar as condições de conforto térmico, associado a um consumo energético económico.

Este trabalho surge com o intuito de analisar o impacto de algumas soluções de aquecimento e arrefecimento nas diferentes zonas climáticas portuguesas recorrendo ao programa de simulação higratérmica DesignBuilder.

O modelo de habitação escolhido foi semelhante ao utilizado no caso BEStest 900, que posteriormente foi implementado no programa DesignBuilder para a análise do comportamento térmico e análise de custos associados à utilização de cada equipamento. O programa possui uma base de dados com uma infinidade de climas obtidos através de dados reais registados em estações meteorológicas locais, o que permite realizar simulações cujos resultados serão o mais próximo possível do comportamento real.

Os equipamentos escolhidos foram um sistema do tipo Bomba de Calor, que funciona tanto para o período de aquecimento como para o período de arrefecimento, e um sistema do tipo Caldeira + Radiador, mais comum nas habitações portuguesas, que apenas funciona para o período de aquecimento.

Após a realização das simulações, procedeu-se à análise dos resultados obtidos. As comparações efetuaram-se a nível de variações de temperatura, energia primária, energia final, energia útil e custos associados aos dois sistemas escolhidos.

PALAVRAS-CHAVE: Climas Portugueses, Comportamento Higratérmico, Consumos Energéticos, DesignBuilder, Simulação.

ABSTRACT

In the last years has increased the implementation of air conditioning systems in residential buildings in order to improve the thermal comfort conditions, associated with economic energy consumption.

This work appears in order to analyse the impact of some heating and cooling solutions in different Portuguese climate zones using the hygrothermal simulation program DesignBuilder.

The house model chosen was similar to that used in the case BEStest 900, which was later implemented in the program DesignBuilder in order to analyse the thermal behaviour and the cost associated with the use of each equipment.

The program has a database with an infinity of climates obtained using real data recorded at local weather stations, allowing simulations results as close to the real behaviour.

The equipments chosen were a heat pump system type that works for both heating period and cooling period, and a boiler + radiator system type, more common in portuguese homes, which only works for heating period.

After running the simulations, proceeded to the analysis of the results. The comparisons were made in the level of temperature variations, primary energy, final energy, useful energy and costs associated with the two chosen systems.

KEYWORDS: Portuguese Climates, Hygrothermal Behaviour, Energy Consumption, DesignBuilder, Simulation.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	2

2. ANÁLISE DO PROGRAMA DESIGNBUILDER (BESTEST 900)	3
2.1. INTRODUÇÃO AOS PROGRAMAS DESIGNBULIDER E ENERGYPLUS	3
2.1.1. DESCRIÇÃO DOS PROGRAMAS	3
2.1.2. APLICAÇÕES DO PROGRAMA	4
2.1.3. INTRODUÇÃO DE DADOS	5
2.1.4. RESULTADOS	13
2.1.5. CÁLCULO NO PROGRAMA ENERGY PLUS – BALANÇO DE CALOR	16
2.2. MODELO DE ESTUDO BESTEST 900	18
2.2.1. DESCRIÇÃO DO BESTEST	18
2.2.2. CARACTERÍSTICAS/ESPECIFICAÇÕES DO BESTEST 900	19
2.2.3. IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO BESTEST 900 NO PROGRAMA DESIGNBUILDER	21
2.2.4. RESULTADOS DO MÉTODO BESTEST 900 NO DESIGNBUILDER E COMPARAÇÃO	26

3. MODELAÇÃO DE EQUIPAMENTOS NO DESIGNBUILDER	29
3.1. EQUIPAMENTOS DE AQUECIMENTO/ARREFECIMENTO	29
3.1.1. CALDEIRAS.	29
3.1.2. MÁQUINAS FRIGORÍFICAS E BOMBAS DE CALOR.	30
3.1.3. EFICIÊNCIA DE MÁQUINAS FRIGORÍFICAS E BOMBAS DE CALOR	31
3.1.4. UNIDADES TERMINAIS	32
3.1.5. VENTILAÇÃO	32
3.2. TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO	33

3.3. TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR RADIAÇÃO	34
3.4. CALDEIRA + RADIADOR (BOILER + RADIATOR)	35
3.5. BOMBA DE CALOR (CHILLER + SPLIT)	37
4. SIMULAÇÕES	39
4.1. DESCRIÇÃO DAS SIMULAÇÕES	39
4.1.1. PARÂMETROS COMUNS.....	39
4.1.2. CENÁRIOS.	41
4.2. PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO	44
4.3. RESULTADOS DETALHADOS PARA O PORTO.....	46
4.3.1. CENÁRIO SEM AQUECIMENTO/ARREFECIMENTO.	46
4.3.2. CENÁRIO COM AQUECIMENTO/ARREFECIMENTO POR BOMBA DE CALOR.....	48
4.3.3. CENÁRIO COM AQUECIMENTO POR CALDEIRA + RADIADOR.	57
4.3.4. COMPARAÇÃO DOS CENÁRIOS PARA O PORTO.	65
4.4. SÍNTESE DE RESULTADOS DE TODAS AS SIMULAÇÕES	68
4.5. ANÁLISE FINANCEIRA	83
5. CONCLUSÕES	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Bibliotecas do DesignBuilder (Componentes e Modelos).....	4
Figura 2 – Hierarquia de dados do DesignBuilder	5
Figura 3 – Painel de Navegação	6
Figura 4 - Componentes da janela do programa	6
Figura 5 – Criação de novo projeto	6
Figura 6 – Exemplo de construção geométrica do modelo.....	7
Figura 7 – Separador onde se efectua a definição dos controlos de temperatura	8
Figura 8 – Separador referente aos elementos construtivos	9
Figura 9 – Separador referente às aberturas	10
Figura 10 – Separador referente aos ganhos energéticos	11
Figura 11 – Separador onde se efectua a selecção de equipamentos HVAC	12
Figura 12 – Resultados Projeto de Aquecimento.....	13
Figura 13 – Resultados Projeto de Arrefecimento	14
Figura 14 – Resultados das Simulações anuais	15
Figura 15 – Simulação Sequencial de uma situação de arrefecimento[7].....	17
Figura 16 – Esquema de resolução da solução simultânea	18
Figura 17 – Modelo BEStest900 no DesignBuilder.....	19
Figura 18 – Dimensões (pelo interior) do modelo BEStest 900	20
Figura 19 – Modelo BEStest 900 visto pelo exterior	22
Figura 20 – Características dos elementos construtivos	22
Figura 21 – Edição de uma parede	23
Figura 22 – Edição de uma camada da parede (Isolamento Térmico).....	23
Figura 23 – Edição do tipo de envidraçado.....	24
Figura 24 – Edição do tipo de material (Vidro).....	24
Figura 25 – Configurações HVAC	25
Figura 26 – Resultados BEStest900 sem isolamento no pavimento	26
Figura 27 – Resultados BEStest900 com isolamento no pavimento	26
Figura 28 – Resultados esperados do modelo BEStest900[3]	27
Figura 29 – Resultados esperados para Projecto de Aquecimento[3].....	27
Figura 30 – Resultados esperados para Projecto de Arrefecimento[3]	28
Figura 31 – Caldeira[10].....	29

Figura 32 – Esquema de funcionamento de Máquinas Frigoríficas e Bombas de Calor.....	30
Figura 33 - Ciclo de Compressão [20].....	30
Figura 34 - Esquema de equipamento com ciclo de compressão	31
Figura 35 – Radiador, Ventiloinvector, Pavimento Radiante e Instalações com ar.....	32
Figura 36 – Ventilação Natural Acção do Vento[11]	32
Figura 37 – Ventilação Natural Efeito Chaminé[12]	33
Figura 38 – Corrente de convecção devido a um radiador [17].....	34
Figura 39 – Espectro electromagnético[19]	34
Figura 40 – Lista de equipamentos HVAC existente na biblioteca do DesignBuilder	35
Figura 41 – Separador HVAC do modelo caldeira + radiador	36
Figura 42 – Esquema de funcionamento do sistema caldeira + radiador.....	36
Figura 43 – Separador do modelo Chiller + Split	37
Figura 45 – Corte transversal da parede, tecto e pavimento (pela ordem de apresentação)	44
Figura 46 – Temperatura de Bolbo Seco do Porto	46
Figura 47 – Temperatura do ar sem equipamentos.....	47
Figura 48 – Temperatura interior no Porto no Cenário A com Equipamento Bomba de Calor	48
Figura 49 - Temperatura interior no Porto no Cenário B com Equipamento Bomba de Calor	49
Figura 50 - Temperatura interior no Porto no Cenário C com Equipamento Bomba de Calor	50
Figura 51 – Potência utilizada pelo sistema de climatização no Cenário A	56
Figura 52 - Potência utilizada pelo sistema de climatização no Cenário B	56
Figura 53 - Potência utilizada pelo sistema de climatização no Cenário C	57
Figura 54 – Número de horas que a temperatura está fora do Setpoint	57
Figura 55 – Limites de Conforto de temperatura para Inverno (azul) e Verão (vermelho)	58
Figura 56 – Temperatura interior com e sem utilização do equipamento caldeira + radiador para Cenário A.....	59
Figura 57 - Temperatura interior com e sem utilização do equipamento caldeira + radiador para Cenário B.....	60
Figura 58 - Temperatura interior com e sem utilização do equipamento caldeira + radiador para Cenário C	60
Figura 59 – Potência do equipamento Caldeira + Radiador para o Cenário A.....	63
Figura 60 – Potência do equipamento Caldeira + Radiador para o Cenário B.....	63
Figura 61 – Potência do equipamento Caldeira + Radiador para o Cenário C	64
Figura 62 – Comparação da Temperatura interior com os 2 equipamentos para o Cenário A	65
Figura 63 – Comparação da Temperatura interior com os 2 equipamentos para o Cenário B	66

Figura 64 – Comparação da Temperatura interior com os 2 equipamentos para o Cenário C.....	66
Figura 65 – Temperatura interior em Bragança sem e com Ar Condicionado	68
Figura 66 – Temperatura interior em Évora sem e com Ar Condicionado.....	69
Figura 67 – Temperatura interior em Lisboa sem e com Ar Condicionado	70
Figura 68 – Temperatura interior em Portalegre sem e com Ar Condicionado	71
Figura 69 – Número de horas que a temperatura ultrapassou os limites do Setpoint.....	72
Figura 70 – Síntese de resultados de energia primária	82
Figura 71 – Síntese de resultados de energia final.....	82
Figura 72 – Síntese de resultados de energia útil.....	83
Figura 73 – Custos de aquecimento para os dois sistemas	86

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Materiais das Paredes.....	20
Tabela 2 – Materiais do Pavimento.....	20
Tabela 3 – Materiais da cobertura.....	20
Tabela 4 – Características dos Envidraçados.....	21
Tabela 5 – Parâmetros característicos do Cenário Inicial	39
Tabela 6 – Concelhos em análise	42
Tabela 7 – A - Cenário Inicial	42
Tabela 8 – B - Cenário Inicial + Sombreamento com estore pelo exterior	43
Tabela 9 – C - Cenário Inicial + Sombreamento com estore pelo exterior + Aquecimento Intermitente.....	43
Tabela 10 – Parâmetros HVAC.....	45
Tabela 11 – Tabela referente ao período de Aquecimento	52
Tabela 12 – Tabela referente ao período de Arrefecimento	53
Tabela 13 – Consumo energético anual final [kWh]	53
Tabela 14 – Necessidades energéticas mensais.....	54
Tabela 15 – Discriminação dos ganhos/perdas de calor para os picos de aquecimento/arrefecimento.....	55
Tabela 16 – Características do sistema Caldeira + Radiador.....	58
Tabela 17 – Tabela referente ao período de aquecimento.....	61
Tabela 18 – Consumo energético anual final para aquecimento.....	61
Tabela 19 – Necessidades energéticas mensais.....	62
Tabela 20 – Comparação para situação de aquecimento	67
Tabela 21 – Cenário A - Aquecimento Ar Condicionado (Chiller) + Split	73
Tabela 22 – Cenário A - Aquecimento Caldeira + Radiador.....	73
Tabela 23 – Cenário A - Arrefecimento Ar Condicionado (Chiller) + Split	73
Tabela 24 – Cenário A - Aquecimento Ar Condicionado (Chiller) + Split	74
Tabela 25 – Cenário A - Aquecimento Caldeira + Radiador.....	74
Tabela 26 – Cenário A - Arrefecimento Ar Condicionado (Chiller) + Split	75
Tabela 27 – Cenário B - Aquecimento Ar Condicionado (Chiller) + Split	76
Tabela 28 – Cenário B - Aquecimento Caldeira + Radiador.....	76
Tabela 29 – Cenário B - Arrefecimento Ar Condicionado (Chiller) + Split	76
Tabela 30 – Cenário B - Aquecimento Ar Condicionado (Chiller) + Split	77
Tabela 31 - Cenário B - Aquecimento Caldeira + Radiador.....	77

Tabela 32 - Cenário B - Arrefecimento Ar Condicionado (Chiller) + Split	78
Tabela 33 – Cenário C - Aquecimento Ar Condicionado (Chiller) + Split	79
Tabela 34 - Cenário C - Aquecimento Caldeira + Radiador	79
Tabela 35 - Cenário C - Arrefecimento Ar Condicionado (Chiller) + Split.....	80
Tabela 36 – Cenário C - Aquecimento Ar Condicionado (Chiller) + Split	80
Tabela 37 - Cenário C - Aquecimento Caldeira + Radiador	81
Tabela 38 - Cenário C - Arrefecimento Ar Condicionado (Chiller) + Split.....	81
Tabela 39 – Consumo anual de gás natural em kWh e Kg	85
Tabela 40 - Consumo anual de gás natural em kWh e m ³	85
Tabela 41 – Custos anuais período de aquecimento Bomba de Calor	86
Tabela 42 – Custos anuais período de aquecimento Caldeira + Radiador	86
Tabela 43 – Consumos anuais período de arrefecimento Bomba de Calor	86

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

AVAC - Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

RCCTE - Regulamento das Características do Comportamento Térmico de Edifícios

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

BES test - Building Energy Simulation test

DOE - The Department Of Energy

CFD - Computational Fluid Dynamics

ac/h - air changes per hour

COP - Coefficient Of Performance

DHW - Domestic Hot Water

ρ_{air} = Massa volúmica do ar $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$

C_p^{air} = Calor específico do ar da zona $\left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$

C_T = Fator de ponderação da transferência de calor sensível $\left[\frac{\text{K}}{\text{m}^3} \right]$

$C_z \frac{dT_z}{dt}$ = Energia total armazenada no ar interior da zona

\dot{Q}_{sys} = Taxa de troca de calor entre o ar interior da zona e o sistema de climatização [W]

T_z = Temperatura da zona [K]

T_{zi} = Temperatura das zonas vizinhas [K]

T_{∞} = Temperatura do ar infiltrado [K]

T_{si} = Temperatura das superfícies existentes na zona [K]

h_i = Coeficiente de troca de calor $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right]$

A_i = Área superficial [m^2]

λ - Condutividade Térmica [W/m.K]

R - Resistência Térmica [$\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$]

C_p - Calor Específico [J/kg.K]

FF - Free Floating

IEA - International Energy Agency

m_{comb} = Massa de combustível [Kg]

PCI = Poder calorífico inferior do combustível $\left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right]$

EER - Energy Efficiency Ratio

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

Na atualidade, os equipamentos AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado) são frequentemente utilizados nas habitações de modo a garantir um ambiente de conforto para os utilizadores.

Em Portugal existem vários tipos de climas, tanto no Inverno como no Verão, pelo que os equipamentos mais adequados para cada situação diferem de região para região. Para escolher o equipamento mais adequado para cada situação é necessário ter em conta dois aspetos relevantes: o conforto térmico e a eficiência energética.

Em Portugal existe um regulamento denominado RCCTE (Regulamento das Características do Comportamento Térmico de Edifícios) que tem como objetivo assegurar as exigências mínimas de conforto térmico, nos casos de aquecimento, arrefecimento, ventilação e águas quentes sanitárias, de maneira a que os consumos de energia não sejam excessivos.

É neste contexto que surgem os programas de simulação higrotérmica de edifícios, como o DesignBuilder, que tornam possível o estudo de várias soluções de forma a otimizar o comportamento térmico e eficiência energética de edifícios.

Este tipo de programas são frequentemente utilizados durante a realização do projeto de uma habitação, pois desta forma o Projetista pode testar os materiais e soluções que pretende utilizar na habitação, e também testar outras alternativas, de modo a verificar qual a melhor solução para cada caso.

Muitas vezes existem dúvidas quanto à fiabilidade dos resultados obtidos neste tipo de programas. Para verificar se as simulações estão a ser realizadas convenientemente existe uma norma, denominada ASHRAE STD 140 (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) que contém os resultados obtidos pelos diversos programas de simulação higrotérmica existentes para um conjunto de modelos definidos, de modo a comparar os resultados e avaliar a fiabilidade dos resultados obtidos.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo primordial da presente dissertação é a aplicação do DesignBuilder à avaliação de soluções de aquecimento e arrefecimento de edifícios para diferentes zonas climáticas portuguesas.

Para concretizar esse objetivo, definiram-se as seguintes etapas:

- Exploração do DesignBuilder como ferramenta de simulação higrotérmica
- Validação das simulações, comparando os resultados obtidos com os esperados, com base no modelo BESTEST 900
- Análise e estudo de equipamentos a utilizar nas simulações
- Modelação simplificada de equipamentos no DesignBuilder
- Análise dos resultados obtidos nas simulações dos vários cenários
- Avaliação do comportamento dos equipamentos nos diversos climas portugueses

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

A presente dissertação está dividida em 5 capítulos:

- No Capítulo 1 apresenta-se o enquadramento desta dissertação, assim como os seus objetivos e um breve resumo do conteúdo de cada capítulo.
- No Capítulo 2 é realizada uma análise detalhada ao programa DesignBuilder. É descrito quais são as principais potencialidades do programa, seguido de uma explicação de como se efetua a introdução de dados e como os resultados podem ser interpretados. Também é realizada uma breve referência ao modelo de validação utilizado e se efetua a sua implementação no programa.
- No Capítulo 3 efetua-se a descrição de como funcionam os equipamentos alvo de estudo, e como estes se podem introduzir no programa, bem como as suas características.
- No Capítulo 4 descrevem-se quais são os cenários definidos para as simulações e quais os parâmetros comuns entre estas. Posteriormente é realizada uma descrição detalhada de alguns cenários para a cidade do Porto, para uma melhor compreensão dos dados a introduzir. No final do presente capítulo é apresentada uma síntese dos resultados obtidos para todos os cenários, seguido de uma discussão dos valores obtidos e uma análise financeira dos consumos registados.
- No Capítulo 5 apresentam-se as principais conclusões resultantes da análise efetuada a todos os cenários presentes nesta dissertação.

2

ANÁLISE DO PROGRAMA DESIGNBUILDER (BESTEST 900)

2.1. INTRODUÇÃO AOS PROGRAMAS DESIGNBUILDER E ENERGYPLUS

2.1.1. DESCRIÇÃO DOS PROGRAMAS

O DesignBuilder[1] é um programa que permite efetuar simulações higrótérmicas de edifícios. Hoje em dia, esta torna-se uma ferramenta fundamental para a avaliação correta do comportamento energético de edifícios, uma vez que permite efetuar simulações muito fiáveis, entrando com uma vasta gama de variáveis, tais como as dimensões do edifício, características das superfícies, equipamentos instalados, etc.

Este programa é uma interface avançada do *software* EnergyPlus[2], que é o responsável pela realização dos cálculos e simulações. O programa EnergyPlus é desenvolvido pelo Departamento de Energia (*DOE – The Department Of Energy*) nos Estados Unidos da América e é de utilização gratuita. É um dos mais utilizados na área, uma vez que é alvo de contínuas atualizações e os resultados são fiáveis. Contudo, a introdução de dados neste programa é algo complexa e trabalhosa, e é aí que aparece o DesignBuilder, como interface gráfica do EnergyPlus, simplificando a introdução de dados.

Existem duas bibliotecas diferentes neste programa (Figura 1): a biblioteca de componentes e a biblioteca de modelos. A primeira, como o próprio nome indica, é uma biblioteca constituída principalmente por materiais de construção, equipamentos, horários de utilização, climas, etc., e a biblioteca de modelos possui modelos já previamente concebidos e que são mais usualmente utilizados.

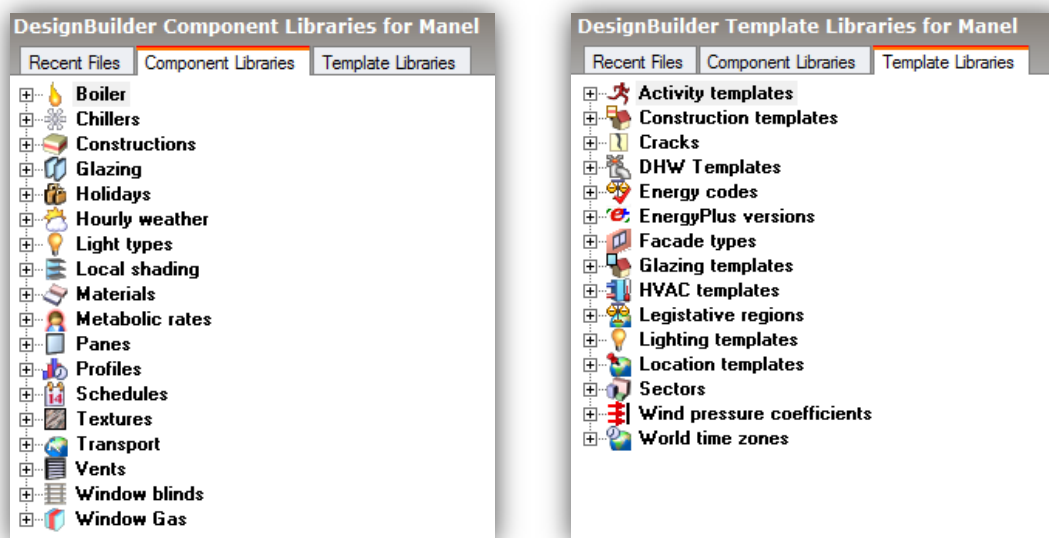


Figura 1 – Bibliotecas do DesignBuilder (Componentes e Modelos)

Existe uma vasta gama de climas disponíveis para implementar, e deste modo torna-se ainda mais próximo da realidade as simulações usadas. Por exemplo, para Portugal, é possível escolher o concelho onde se insere o edifício, o que resulta numa simulação mais fiável, pois está-se a realizar a simulação com dados climatéricos de uma região mais específica, e não de um país, já que este pode ter vários climas na sua área, que é o que normalmente acontece.

O EnergyPlus utiliza como procedimento de controlo de qualidade, de modo a garantir a precisão dos resultados, o *Standard Method BESTest/ASHRAE STD 140 (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers)*[3]. Nesta dissertação vai ser utilizado o modelo *BESTEST 900* para validar os resultados das simulações.

No *website*[1] são disponibilizados dois tutoriais de fácil compreensão, de modo a facilitar a introdução ao programa e a forma como se utiliza.

2.1.2. APLICAÇÕES DO PROGRAMA

Este programa é frequentemente utilizado para estudar decisões de *design* em edifícios, como a orientação, forma, equipamentos, etc. na eficiência energética do edifício em análise. Também é possível realizar uma análise detalhada dos sistemas de aquecimento, arrefecimento e iluminação, já que é possível retirar dados relativos a consumos de energia, flutuação da temperatura, entre outros dados mais pormenorizados, em relação a estes sistemas.

2.1.3. INTRODUÇÃO DE DADOS



Figura 2 – Hierarquia de dados do DesignBuilder

Para compreender melhor o funcionamento do programa, primeiro é necessário perceber como funciona a hierarquia de dados. No lado esquerdo do programa, existe um menu chamado Painel de Navegação onde se pode ver a sequência da hierarquia de dados demonstrada na Figura 2, de uma maneira mais perceptível. Ao introduzir uma alteração numa determinada categoria, esta alteração irá ser aplicada a todos os níveis subjacentes à qual a alteração foi efetuada, não havendo necessidade de alterar o que quer que seja nestas categorias subjacentes.

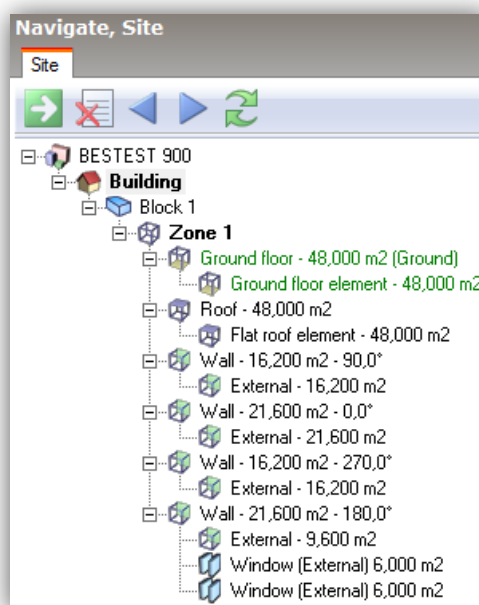


Figura 3 – Painel de Navegação

Isto é bastante útil caso se pretenda introduzir alterações significativas no edifício. Por exemplo, supondo que se pretende alterar a constituição das paredes de um edifício. Em vez de alterar a sua constituição parede a parede, pode-se introduzir essa alteração na categoria *Block*, se se pretende apenas alterar as paredes de um único piso, ou então na categoria *Building*, sendo esta alteração aplicada a todas as paredes do edifício.

Na Figura 4 pode-se observar o esquema geral da janela do programa, com os seus vários componentes identificados.

Na parte superior encontra-se o Menu do programa, onde se podem fazer diversas operações como abrir ou guardar um projeto, assim como exportar dados para outro programa, ou vice-versa. Na barra de ferramentas é onde estão as ferramentas utilizadas para a construção/edição geométrica do modelo que pretendemos construir.

O Pannel de Navegação, como já foi referido acima, serve para seleccionar uma zona em particular do edifício, uma secção, ou mesmo o edifício completo, de modo a introduzir as alterações nos elementos pretendidos.

A Tela de Edição é onde se efetua a construção geométrica do edifício, e navegando pelos vários Separadores de Dados, é nesta zona que se vai efetuar o respetivo dimensionamento construtivo, sistemas AVAC, aberturas, iluminação e tipo de atividade desenvolvida no edifício. Alternando entre os Separadores de Telas, pode-se observar o modelo que se está a construir, o projeto de aquecimento, projeto de arrefecimento, as simulações, *CFD (Computational Fluid Dynamics)*, e a iluminação natural. O Pannel de Informação serve como um guia de ajuda/orientação nas tarefas que se estão a realizar.

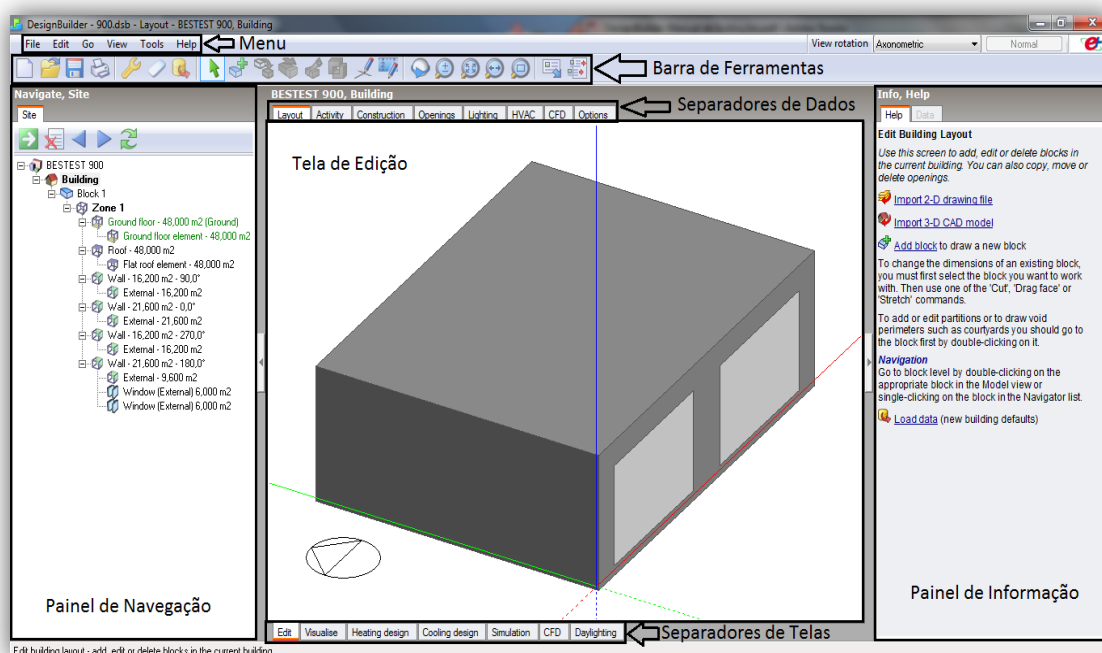


Figura 4 - Componentes da janela do programa

Quando se cria um novo projeto no DesignBuilder[1], inicialmente é necessário que escolher o nome do projeto, o tipo de clima onde se insere, ou seja, escolhendo a cidade onde se irá localizar o edifício, e escolhendo também o tipo de análise que se pretende efectuar, que neste caso será o EnergyPlus[2].

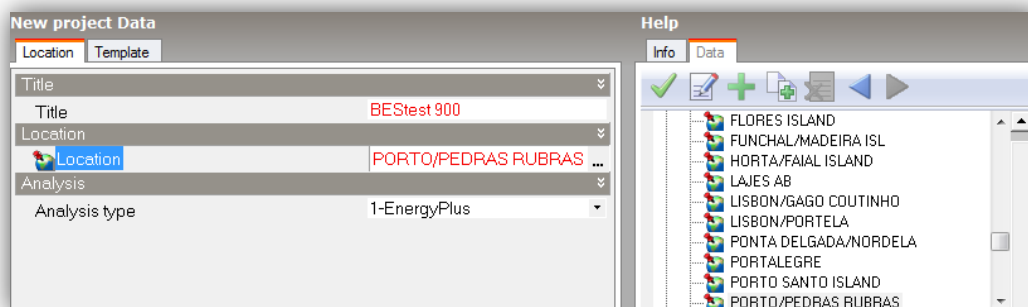


Figura 5 – Criação de novo projeto

Posteriormente, efectua-se a definição geométrica do modelo que pretendemos construir. Esta etapa é relativamente simples, uma vez que o DesignBuilder[1] utiliza uma plataforma semelhante ao Google SketchUp[4], uma ferramenta muito utilizada para construção de modelos em 3D. Contudo, se já se tiver o modelo contruido, pode-se fazer uma importação de dados, não sendo necessário construir este no DesignBuilder[1].

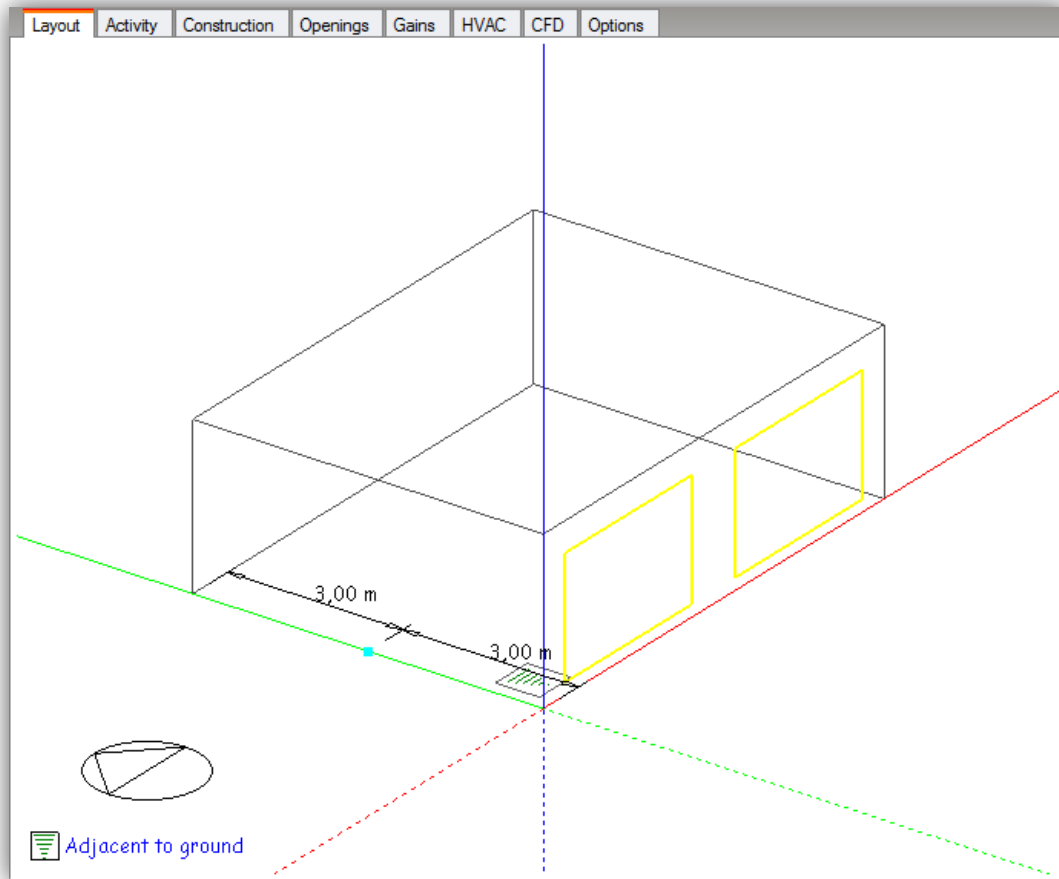


Figura 6 – Exemplo de construção geométrica do modelo

Como se pode observar na Figura 6, a construção geométrica do modelo é relativamente simples. A implementação de portas e janelas é apenas realizada numa etapa mais à frente na construção. Nesta altura apenas se desenhavam as paredes interiores e exteriores e o telhado, que pode ser inclinado ou plano. A construção é realizada por blocos, que correspondem a pisos na realidade.

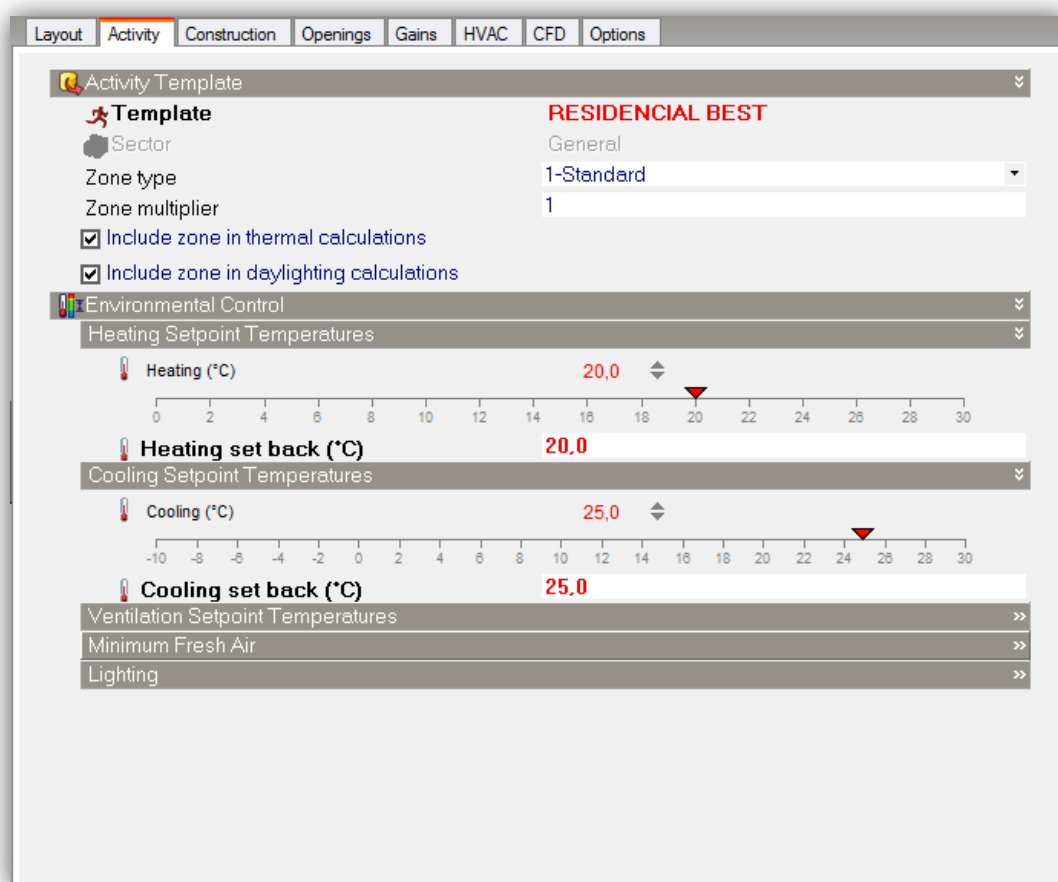


Figura 7 – Separador onde se efetua a definição dos controlos de temperatura

Neste separador (Figura 7), denominado '*Activity*' efetuam-se as configurações de controlo de temperatura, de modo a definir o intervalo de temperatura interior que pretendemos para a zona selecionada. É possível definir a temperatura de *setpoint*, que corresponde à temperatura pretendida para quando na zona estão presentes pessoas, e também é possível definir a temperatura de *setback*, que corresponde à temperatura para quando não está ninguém presente na zona ou seja, quando esta não está com ocupação.

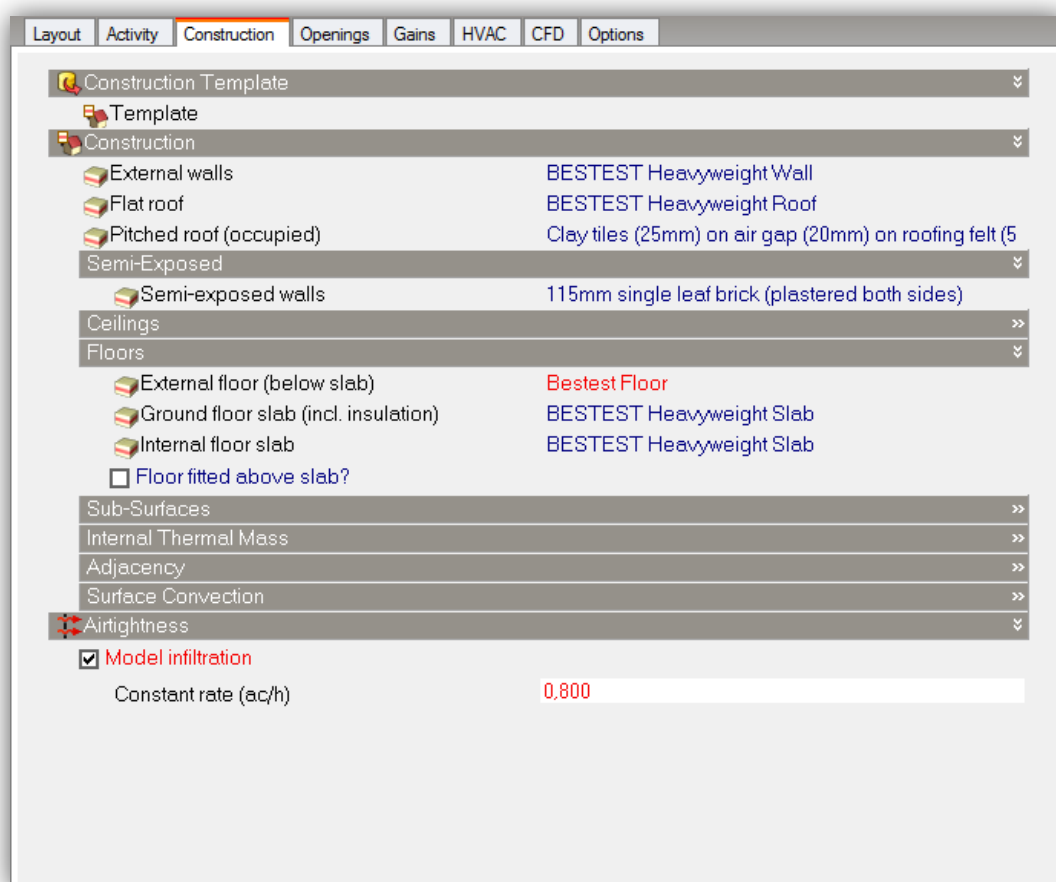


Figura 8 – Separador referente aos elementos construtivos

Na Figura 8 encontra-se o separador 'Construction' que é referente aos elementos construtivos. É aqui que se introduzem as características construtivas de todos os elementos do modelo em análise, como as paredes, pavimento e cobertura. Também se define a infiltração de ar através destes elementos, traduzida em mudanças de ar por hora ('ac/h' – *air changes per hour*). Neste separador apenas se definiram as 'external walls' referentes às paredes, 'flat roof' que corresponde à cobertura plana tal como no modelo, e o 'external floor' que faz referência ao pavimento. Nada mais foi definido aqui uma vez que os restantes aspetos não estão representados no modelo alvo de análise.

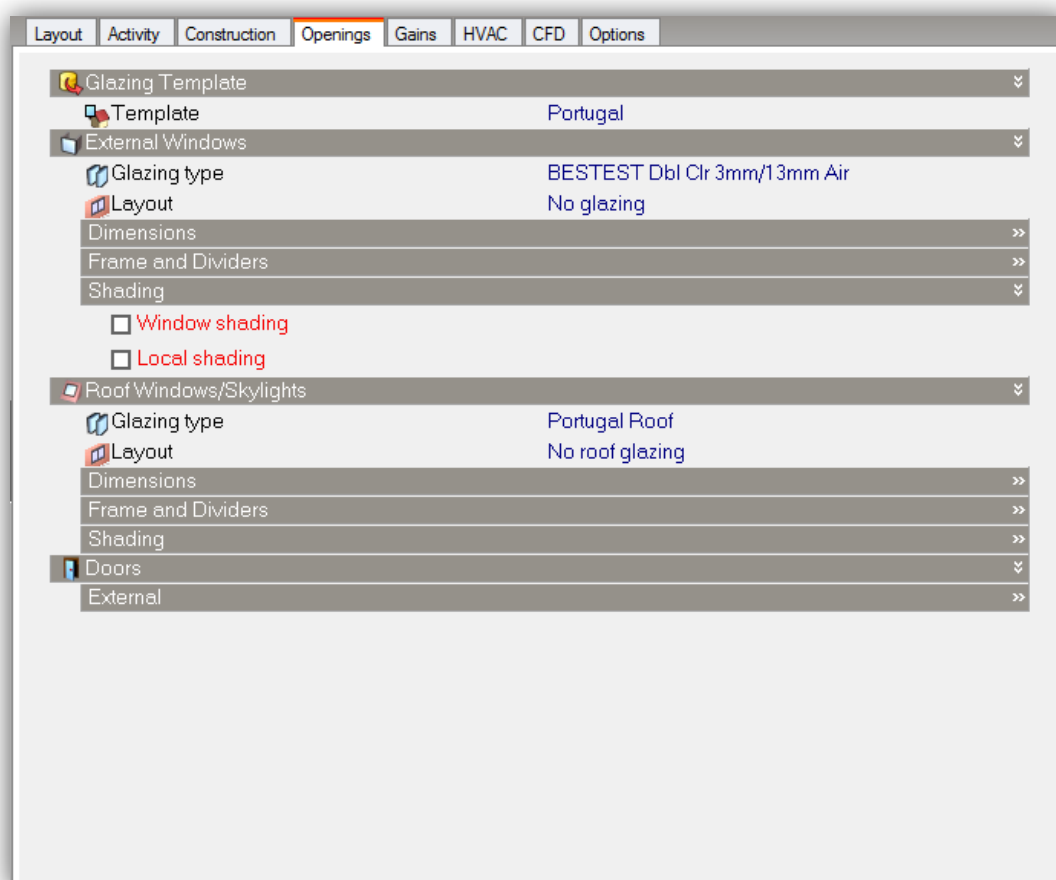


Figura 9 – Separador referente às aberturas

No separador das aberturas (Figura 9) são introduzidas as características dos envidraçados, bem como das portas. Neste modelo não existem portas, por isso não foram definidas neste separador. Também não foi definido o 'roof windows' já que o modelo não possui qualquer tipo de envidraçado na cobertura, contudo se existisse era neste campo que se iria introduzir as suas características. Apenas foram definidas neste separador as características dos envidraçados, mais propriamente as características dos dois panos de vidro e da camada que os separa, uma vez que o tipo de envidraçado presente neste modelo é vidro duplo.

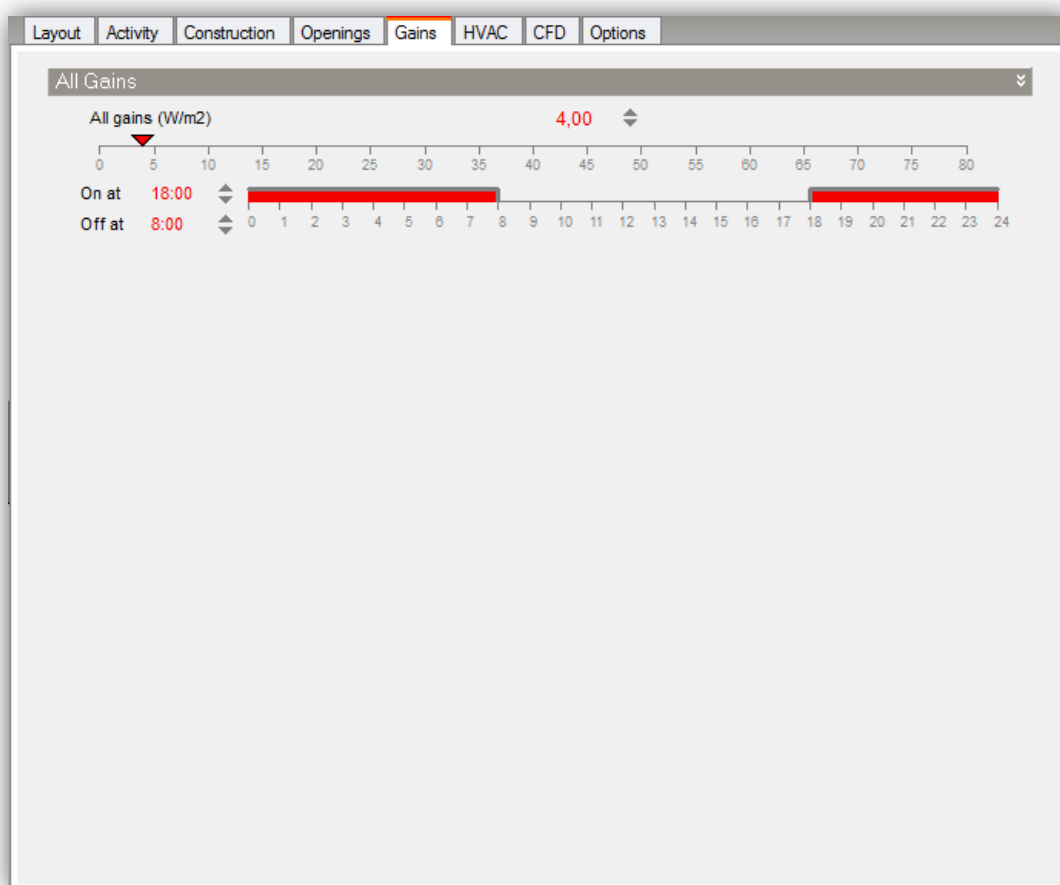


Figura 10 – Separador referente aos ganhos energéticos

Na Figura 10 está demonstrado o separador referente aos ganhos energéticos. É possível definir os ganhos energéticos de forma simples, tal como está na figura, em que apenas se define o valor em W/m^2 , e o horário em que estes ganhos acontecem, mas também é possível definir os ganhos de forma detalhada, em que estes são distribuídos em:

- Ocupação humana
- Computadores
- Equipamento de escritório
- Iluminação
- Equipamentos em funcionamento
- Restauração

Em todos os casos é possível definir o valor dos ganhos, assim como o seu horário. No caso em estudo, como se pretende efetuar as simulações para uma habitação, de acordo com o RCCTE [15], no Quadro IV.3 para um edifício residencial os ganhos totais estão definidos em 4 W/m^2 , pelo que foi definido este valor segundo o método simples, sem haver necessidade de dividir os ganhos pelas categorias existentes.

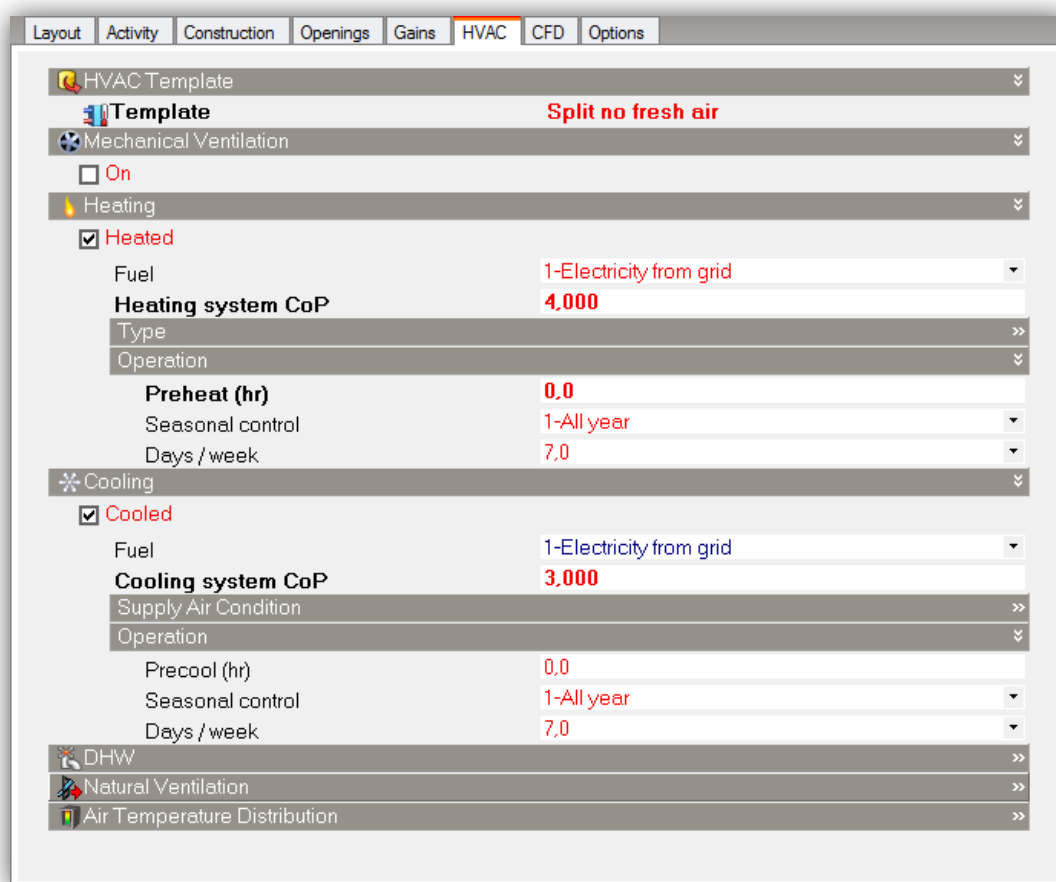


Figura 11 – Separador onde se efetua a seleção de equipamentos HVAC

Nesta secção efetua-se a seleção de equipamentos a introduzir no modelo construtivo. Existem já modelos de equipamentos pré-definidos na biblioteca do DesignBuilder[1], que podem ser ajustados como o projetista assim o entender. É possível definir o tipo de combustível utilizado por cada equipamento, assim como o período de funcionamento que pode ser sazonal (Verão ou Inverno) ou anual e o número de dias de semana em que está em funcionamento. Também se pode introduzir o *COP* (*Coefficient Of Performance*) dos equipamentos, que corresponde à sua eficiência e definir um horário de pré-aquecimento ou pré-arrefecimento, se assim se entender necessário. Existe a possibilidade de ligar certas funções como a ventilação natural e/ou ventilação mecânica, e também as águas quentes sanitárias (*DHW – Domestic Hot Water*) contudo, não estão explicadas uma vez que não vão ser utilizadas ao longo deste trabalho. Deste modo pode-se introduzir as informações de catálogo de um determinado equipamento, e testá-lo no modelo em análise.

2.1.4. RESULTADOS

Neste subcapítulo são apresentadas as diversas formas de apresentação de resultados que é possível obter no programa, e o que é que estes significam. Deste modo torna-se mais fácil a interpretação dos resultados obtidos ao longo das simulações e o que interessa analisar em cada caso.

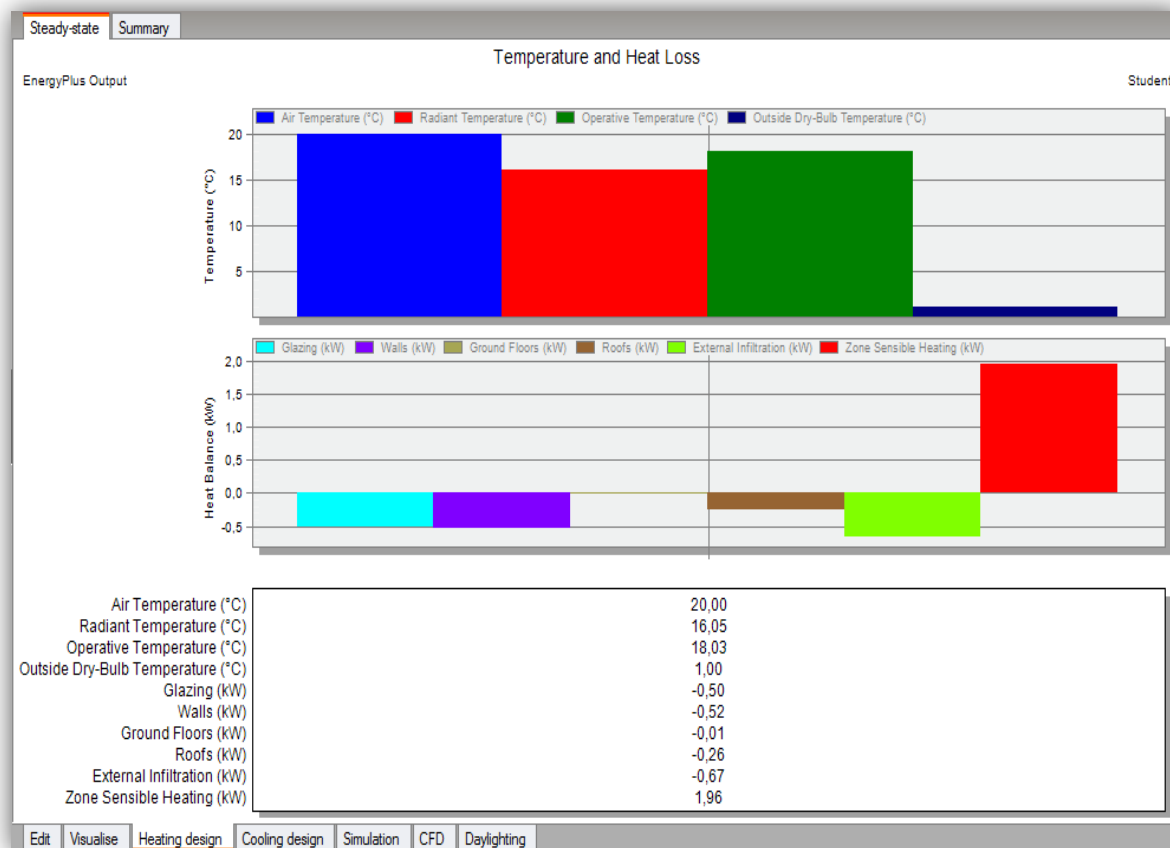


Figura 12 – Resultados Projeto de Aquecimento

Após o programa correr a simulação relativamente ao projeto de aquecimento, sabendo que esta ocorre para o pior caso de Inverno para a localização do edifício existente nos dados referentes ao clima, aparecem os resultados referentes a temperatura e energia (Figura 12). O primeiro gráfico diz respeito às temperaturas, existindo 4 tipos de temperatura: do ar (azul), radiante (vermelho), operativa (verde) e exterior de bolbo seco que é a temperatura sem o efeito da humidade e radiação (azul escuro). O seguinte gráfico diz respeito aos consumos de energia, sendo a última barra a vermelho a soma total da energia das barras anteriores, obtendo-se assim os gastos totais para aquecimento. Através deste gráfico é possível observar em que componentes da habitação estão implicados mais gastos energéticos, observando qual a barra negativa maior.

De modo a facilitar a obtenção de valores para os resultados, em vez de retirar diretamente os valores do gráfico, pode-se consultar a tabela fornecida, com os valores exatos para cada temperatura, assim como os gastos energéticos implicados em cada componente.

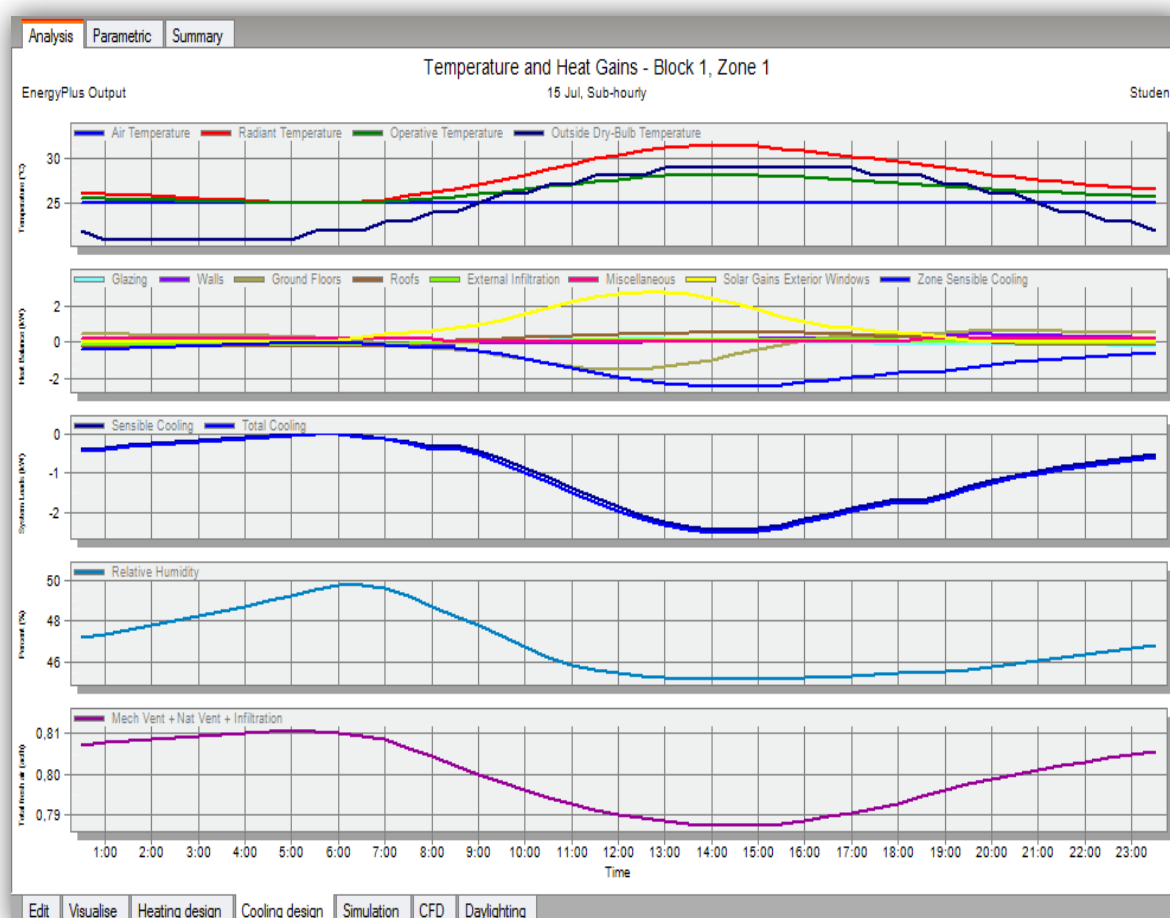


Figura 13 – Resultados Projeto de Arrefecimento

Quando se efetua uma simulação para o projeto de arrefecimento, o resultado final é obtido sob a forma de um gráfico, como demonstra a figura 13, ou então segundo uma tabela, que posteriormente pode ser exportada para outro programa como por exemplo, o *Microsoft Excel*. Existem 5 gráficos, em cada um estão representados, respetivamente: temperaturas, balanço de energia, cargas do sistema, humidade relativa e renovações do ar por hora. Esta simulação é realizada para o pior caso de Verão para a localização do edifício existente nos dados referentes ao clima, ou seja, para o Verão em que as temperaturas registadas naquela localidade foram as mais elevadas. No gráfico relativo às temperaturas, estando representadas 4 tipos: do ar (azul), radiante (vermelho), operativa (verde) e exterior de bolbo seco que é a temperatura sem o efeito da humidade e radiação (azul escuro). No gráfico do balanço de energia os ganhos estão divididos em: ganhos através da caixilharia (azul claro), através das paredes (roxo), pavimento (castanho claro), cobertura (castanho escuro), infiltração externa (verde claro), ganhos solares através dos envidraçados (amarelo), devido ao sistema de arrefecimento (azul) e outros (cor-de-rosa).

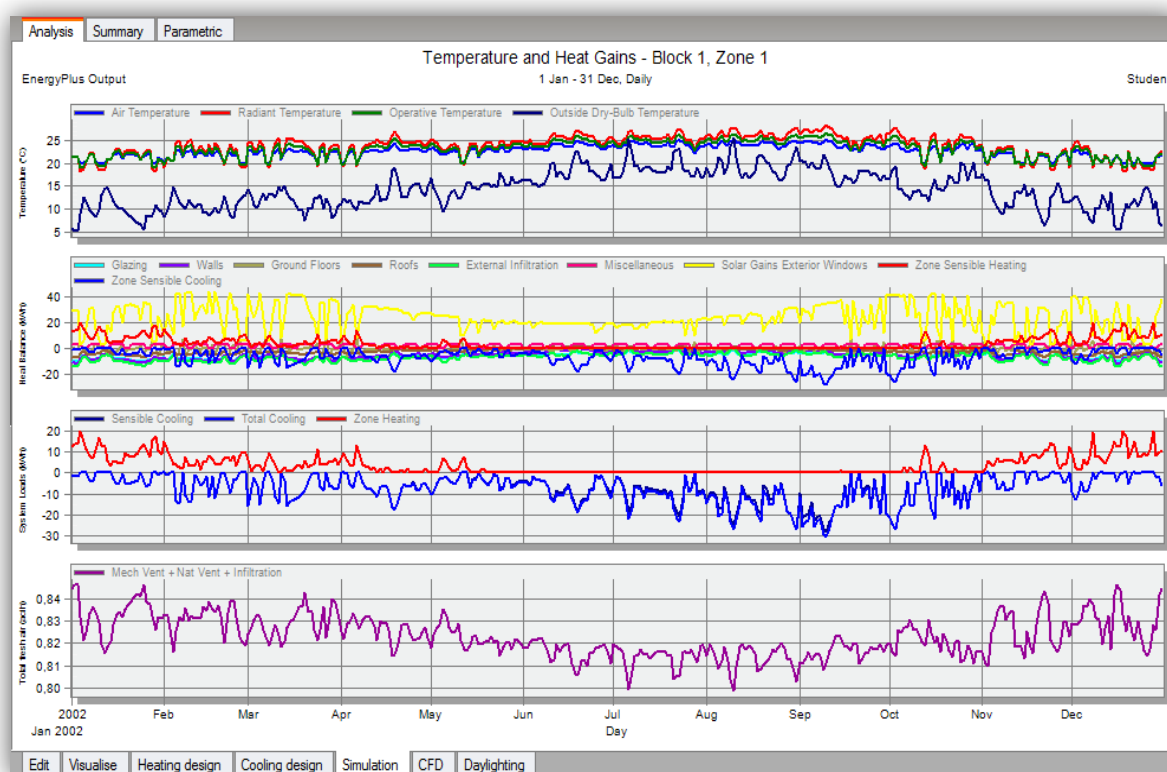


Figura 14 – Resultados das Simulações anuais

As simulações anuais, como como demonstra a Figura 14, são efetuadas para um ano completo, e os cálculos são realizados à hora. Os dados podem ser consultados em gráfico, como na figura anterior, ou sob forma de tabelas, no separador *Summary*. Estas simulações fornecem valores de consumo de combustíveis anualmente, dependendo do tipo de equipamentos instalados, assim como de variações de temperatura, cargas do sistema e renovações do ar por hora. Também é possível exportar a tabela com as simulações realizadas para as 8760 horas anuais para outros programas, em formato de folha de cálculo. No gráfico relativo às temperaturas, estando representadas 4 tipos: do ar (azul), radiante (vermelho), operativa (verde) e exterior de bolbo seco que é a temperatura sem o efeito da humidade e radiação (azul escuro). No gráfico do balanço de energia os ganhos estão divididos em: ganhos através da caixilharia (azul claro), através das paredes (roxo), pavimento (castanho claro), cobertura (castanho escuro), infiltração externa (verde claro), ganhos solares através dos envidraçados (amarelo), devido ao sistema de arrefecimento (azul), devido ao sistema de aquecimento (vermelho) e outros (cor-de-rosa). No gráfico das cargas do sistema estão representadas as cargas para o sistema de aquecimento (vermelho), e para o sistema de arrefecimento (azul).

2.1.5. CÁLCULO NO PROGRAMA ENERGY PLUS – BALANÇO DE CALOR

A temperatura interior é calculada a partir de um balanço energético. A equação utilizada para realizar esse balanço é a seguinte:

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p^{air} (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p^{air} (T_{\infty} - T_z) + \dot{Q}_{sys} \quad (1)$$

Em que:

$$C_z = \rho_{air} C_p^{air} C_T$$

$$\rho_{air} = \text{MASSA VOLÚMICA DO AR} \left[\frac{\text{KG}}{\text{M}^3} \right]$$

$$C_p^{air} = \text{CALOR ESPECÍFICO DO AR DA ZONA} \left[\frac{\text{J}}{\text{KG} \cdot \text{K}} \right]$$

$$C_T = \text{FATOR DE PONDERAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR SENSÍVEL} \left[\frac{\text{K}}{\text{M}^3} \right]$$

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \text{ENERGIA TOTAL ARMAZENADA NO AR INTERIOR DA ZONA}$$

$$\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i = \text{SOMA DOS GANHOS INTERNOS POR CONVECÇÃO [W]}$$

$$\sum_{i=1}^{N_{SURFACES}} h_i A_i (T_{si} - T_z) = \text{TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO ORIGINÁRIA DAS SUPERFÍCIES EXISTENTES NA ZONA}$$

$$\sum_{i=1}^{N_{ZONES}} \dot{m}_i C_p^{air} (T_{zi} - T_z) = \text{TRANSFERÊNCIA DE CALOR DEVIDO À INFILTRAÇÃO DE AR EXTERIOR [W]}$$

$$\dot{Q}_{sys} = \text{TAXA DE TROCA DE CALOR ENTRE O AR INTERIOR DA ZONA E O SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO [W]}$$

$$T_z = \text{TEMPERATURA DA ZONA [K]}$$

$$T_{zi} = \text{TEMPERATURA DAS ZONAS VIZINHAS [K]}$$

$$T_{\infty} = \text{TEMPERATURA DO AR INFILTRADO [K]}$$

$$T_{si} = \text{TEMPERATURA DAS SUPERFÍCIES EXISTENTES NA ZONA [K]}$$

$$h_i = \text{COEFICIENTE DE TROCA DE CALOR} \left[\frac{\text{W}}{\text{M}^2 \cdot \text{K}} \right]$$

$$A_i = \text{ÁREA SUPERFICIAL [M}^2\text{]}$$

A troca de calor entre o ar interior da zona e o sistema de climatização, \dot{Q}_{sys} , pode ser equacionada pela diferença entre a entalpia de ar fornecido e a entalpia do ar extraído:

$$\dot{Q}_{sys} = \dot{m}_{sys} C_p (T_{sup} - T_z) \quad (2)$$

Esta equação assume que a taxa de fluxo de ar que entra é exatamente igual à soma das taxas de fluxo de ar que saem da zona de admissão de ar através do sistema de ar e sendo extraídos diretamente a partir da zona. Ambos os fluxos de ar saem da zona à temperatura média do ar na zona. Substituindo \dot{Q}_{sys} na equação do balanço de calor, obtemos a seguinte equação:

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p^{air} (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p^{air} (T_{\infty} - T_z) + \dot{m}_{sys} C_p (T_{sup} - T_z) \quad (3)$$

O EnergyPlus é um programa de simulação integrada, isto é, simula conjuntamente as zonas de construção, os sistemas de tratamento de ar e distribuição. Nos programas de simulação sequencial, como o BLAST[5] ou o DOE-2[6], as zonas de construção, sistemas de tratamento de ar e distribuição são simulados sequencialmente, não havendo troca de dados entre si. A sequência de simulação começa com balanço de calor na zona que atualiza as condições da zona e determina as cargas de aquecimento/arrefecimento necessárias para o intervalo de tempo em questão.

Posteriormente esta informação é enviada para a simulação de tratamento de ar para determinar a resposta do sistema, mas esta resposta não afeta as condições da zona.

Da mesma forma, o sistema corre a simulação da distribuição, não existindo também troca de informação.

Esta técnica de simulação é eficaz quando a resposta do sistema é uma função bem definida da temperatura do ar no espaço condicionado.

Para um caso de arrefecimento, uma situação típica de necessidade e fornecimento está demonstrada na Figura 15, onde se pode ver a curva da capacidade do sistema de fornecimento e a curva da necessidade de arrefecimento da zona, ambas em função da temperatura e potência, em cada ponto.

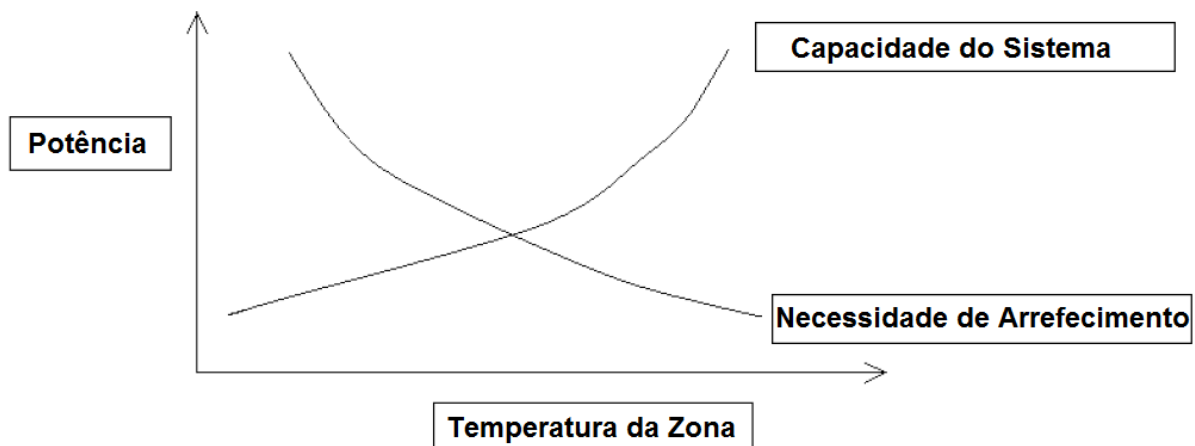


Figura 15 – Simulação Sequencial de uma situação de arrefecimento[7]

Contudo, na maioria das situações, a capacidade do sistema está dependente das condições do exterior e/ou outros parâmetros referentes à zona. A simples situação de necessidade e fornecimento descrita acima torna-se numa situação mais complexa e a curva do sistema não é fixa. A solução seria mover para cima e para baixo a curva da capacidade do sistema, mas isto não acontece numa simulação sequencial e a falta de transmissão de dados entre o sistema e o edifício pode levar a resultados fisicamente impossíveis.

Para obter uma solução que é realística fisicamente, os elementos têm que estar ligados numa simulação conjunta. O programa de simulação pode ser representado como uma série de elementos funcionais ligados por ciclos (loops) como demonstrado na figura 13. No EnergyPlus[2] todos os

elementos estão interligados e controlados pelo “Integrated Solution Manager”. As ligações são divididas em necessidade e fornecimento e o esquema de solução baseia-se numa sucessão de iterações utilizando a filosofia de Gauss-Seidell de atualização contínua.

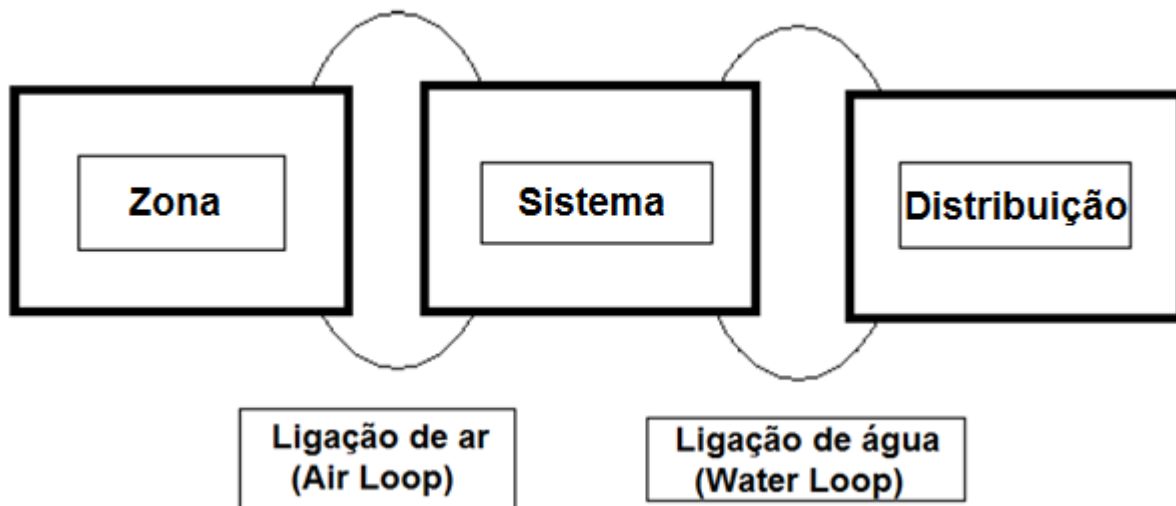


Figura 16 – Esquema de resolução da solução simultânea

2.2. MODELO DE ESTUDO BESTEST 900

2.2.1. DESCRIÇÃO DO BESTEST

O método *BESTest* (*Building Energy Simulation test*), da *Standard Method BESTest/ASHRAE STD 140* (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*), é um método que permite efetuar a validação de resultados de programas de simulação do comportamento higratérmico de edifícios.

Este método foi desenvolvido pela *IEA* (*International Energy Agency*) com o intuito de ajudar a validação de simulações de programas, uma vez que existem varias dificuldades com a utilização destes programas, pois é difícil prever que resultados esperar, podendo estes estar errados e não nos apercebermos disso.

A implementação deste método passa por introduzir nos programas um edifício com características geométricas já definidas, assim como a sua caracterização construtiva e equipamentos instalados. Após efetuar a simulação do método obtém-se um conjunto de resultados que tem que estar de acordo com um intervalo já pré-definido inicialmente, ou seja, os resultados esperados. Se os valores obtidos se encontrarem dentro desse intervalo significa que a introdução de dados relativa ao edifício foi realizada corretamente e que o programa está a fazer as simulações dentro da normalidade.

O intervalo de resultados esperados é obtido com base na mesma simulação em diversos programas semelhantes, sendo estes relativamente parecidos entre si em termos de resultados.

Existem 4 grupos diferentes neste método: construções leves (*Low Mass*); construções pesadas (*High Mass*); sem equipamentos de aquecimento/arrefecimento (*Free Float*); análise mais aprofundada do comportamento térmico (*In Depth*)[8].

Dentro destes grupos, os casos para simulação ainda são diferenciados com base em elementos de sombreamento, mudanças de orientação dos envidraçados, acréscimo de uma zona térmica e ventilação noturna.

No caso do DesignBuilder[1], o BEStest 900 sofre uma ligeira alteração, nomeadamente no pavimento, relativamente à constituição dos elementos construtivos, uma vez que existem restrições ao nível da espessura de camadas, não sendo possível introduzir a espessura de isolamento designada no modelo, o que conduz a resultados diferentes do esperado, pelo que esta camada não é considerada. No *site* do programa[1] pode-se efetuar o *download* dos dados relativos ao modelo BEStest aplicado ao DesignBuilder[3]. Também é disponibilizado um ficheiro que contém já todos os casos relativos ao BEStest introduzidos no DesignBuilder, pelo que apenas é necessário correr o modelo pretendido e verificar se os resultados obtidos nessa simulação estão de acordo com os resultados esperados, que também são fornecidos, de modo a verificar se o programa está a efetuar corretamente as simulações.

2.2.2. CARACTERÍSTICAS/ESPECIFICAÇÕES DO BESTEST 900

Neste subcapítulo são apresentadas as características do modelo BEStest 900, que é o modelo selecionado para efetuar os testes de modo a verificar se o programa está a funcionar corretamente. De seguida estão representadas as dimensões do modelo, assim como as características relativas à constituição das paredes, pavimento, cobertura e envidraçados. De referir que ambos os envidraçados se encontram orientados a Sul.



Figura 17 – Modelo BEStest900 no DesignBuilder

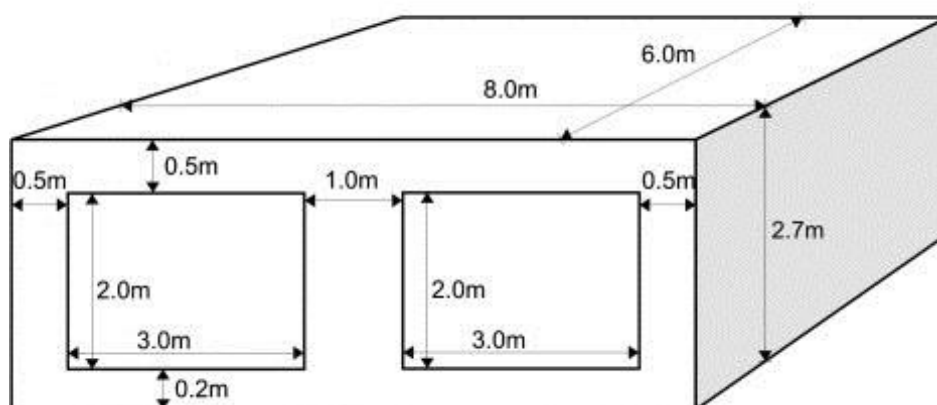


Figura 18 – Dimensões (pelo interior) do modelo BEStest 900

Tabela 1 – Materiais das Paredes

Elemento	λ [W/m.K]	Espessura [m]	R [m².K/W]	Densidade [kg/m³]	Cp [J/kg.K]
Alvenaria de Blocos de Betão	0,510	0,100	0,196	1400	1000
Isolamento Térmico	0,040	0,0615	1,537	10	1400
Revestimento em Madeira	0,140	0,009	0,064	530	900

Tabela 2 – Materiais do Pavimento

Elemento	λ [W/m.K]	Espessura [m]	R [m².K/W]	Densidade [kg/m³]	Cp [J/kg.K]
Laje de Betão Armado	1,130	0,080	0,071	1400	1000
Isolamento Térmico	0,040	1,007	25,175	-	-

Tabela 3 – Materiais da cobertura

Elemento	λ [W/m.K]	Espessura [m]	R [m².K/W]	Densidade [kg/m³]	Cp [J/kg.K]
Placas de Gesso Cartonado	0,160	0,010	0,063	950	840
Isolamento Térmico	0,040	0,1118	2,794	12	840
Revestimento em Madeira	0,140	0,019	0,136	530	900

Tabela 4 – Características dos Envidraçados

Propriedades do Envidraçado	
Coeficiente de Extinção	0,0196/mm
Número de Vidros	2
Espessura do Vidro	3,175 mm
Espaço de Ar entre Vidros	13 mm
Índice de Refração	1,526
Transmissão Normal da Radiação Direta através de um Vidro	0,86156
Condutibilidade Térmica do vidro	1,06 W/m.K
Condutância de cada Vidro	333 W/m ² .K
Coeficiente Combinado de Transferência por Radiação e Convecção da Caixa-de-Ar	6,297 W/m ² .K
Coeficiente de Transferência Exterior Combinado	21,00 W/m ² .K
Coeficiente de Transferência Interior Combinado	8,29 W/m ² .K
U – Coeficiente de Transmissão Térmica	3,0 W/m ² .K
Emitância do Vidro	0,9
Densidade do Vidro	2500 kg/m ³
Calor Específico	750 J/kg.K
Dispositivo de Sombreamento Interior	Nenhum
Sombreamento do Vidro Duplo para Incidência Normal	0,907
Factor Solar do Vidro	0,789

2.2.3. IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO BESTEST 900 NO PROGRAMA DESIGNBUILDER

A implementação do modelo BESTest 900 no programa DesignBuilder foi feita um pouco à semelhança com o que já foi descrito anteriormente, para a criação de um novo projeto. Volto a referir que utilizei um modelo já construído, disponível no *site* do programa[1], contudo, também introduzi eu próprio o modelo, numa fase mais inicial, de modo a aprender e compreender melhor o programa e o seu funcionamento.

Inicialmente, criou-se um novo projeto, em que foi atribuído o clima de Denver Stapleton, Colorado, e optou-se por fazer uma análise através do EnergyPlus[2]. Após concretizar esta etapa inicial, introduziu-se o modelo geométrico do BESTest 900. De destacar que as medidas que se introduzem, são as medidas pelo exterior, pelo que temos que ter em conta a espessura das paredes, assim como do teto e do pavimento, de modo a respeitar os valores da Figura 18. Após a introdução do modelo, este apresenta-se como podemos observar na Figura 19.

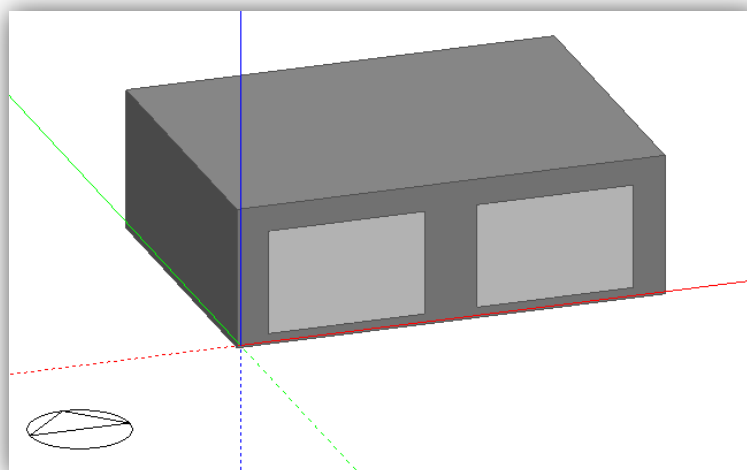


Figura 19 – Modelo BEStest 900 visto pelo exterior

De seguida definiram-se as características das paredes, assim como do teto, pavimento e envidraçados. Para introduzir estas características, foi-se ao separador *Construction* e depois, começando nas paredes (*External Walls*), por exemplo, editou-se cada elemento, introduzindo o número de camadas, e as características de cada camada.

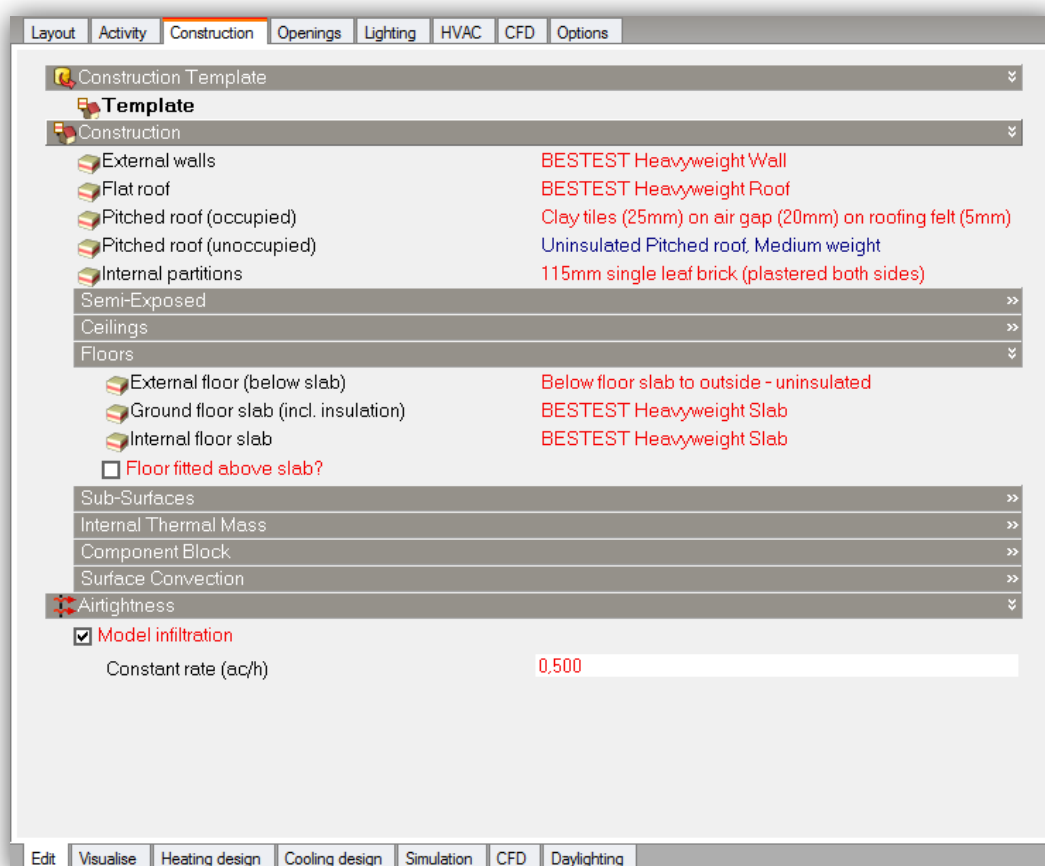


Figura 20 – Características dos elementos construtivos

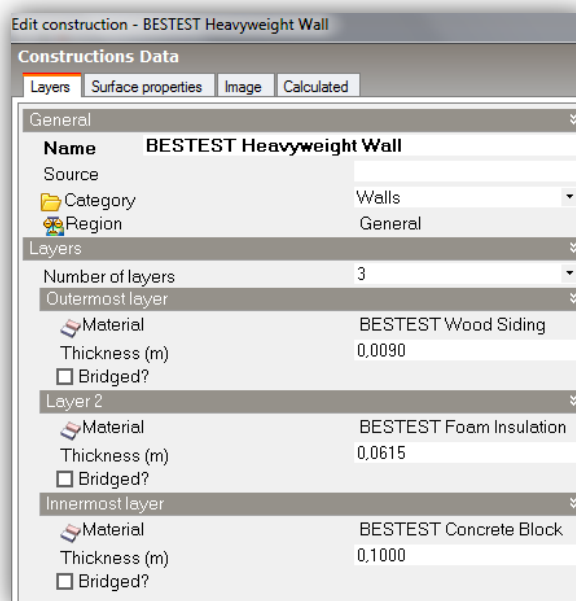


Figura 21 – Edição de uma parede

Esta forma de alteração das camadas é muito útil, uma vez que se não existir o tipo de material que se pretende inserir naquela camada, é possível criar um novo material, e implementar as características de modo a obter o material pretendido. Na Figura 22 podem-se observar as características que é possível inserir quando se cria um material, que foi o que sucedeu aqui, uma vez que o isolamento que se pretendia para as paredes não existia, logo foi necessário criar um de raiz.

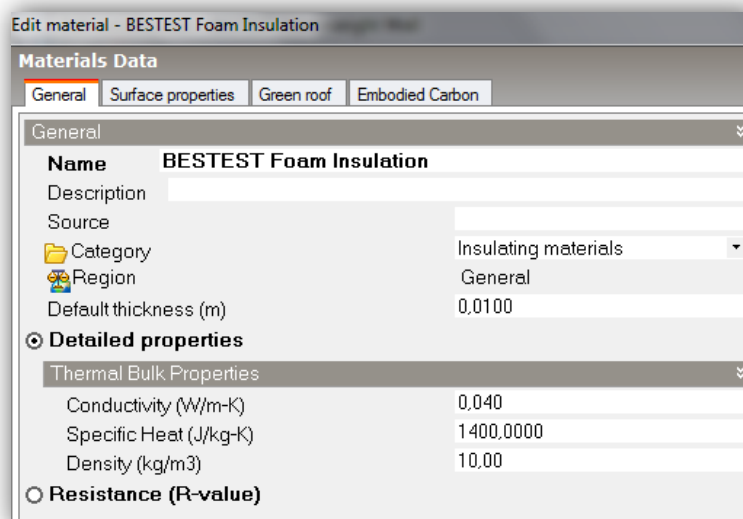


Figura 22 – Edição de uma camada da parede (Isolamento Térmico)

De seguida, entrou-se no separador *Openings* para introduzir as características dos envidraçados. Abriu-se a secção *External Windows* e escolheu-se *Glazing type*. Nesta secção, criou-se um novo envidraçado, com 3 camadas, duas camadas de vidro igual e uma camada de ar entre elas. As características do vidro foram introduzidas à semelhança do material das paredes, como se pode observar pela Figura 24.

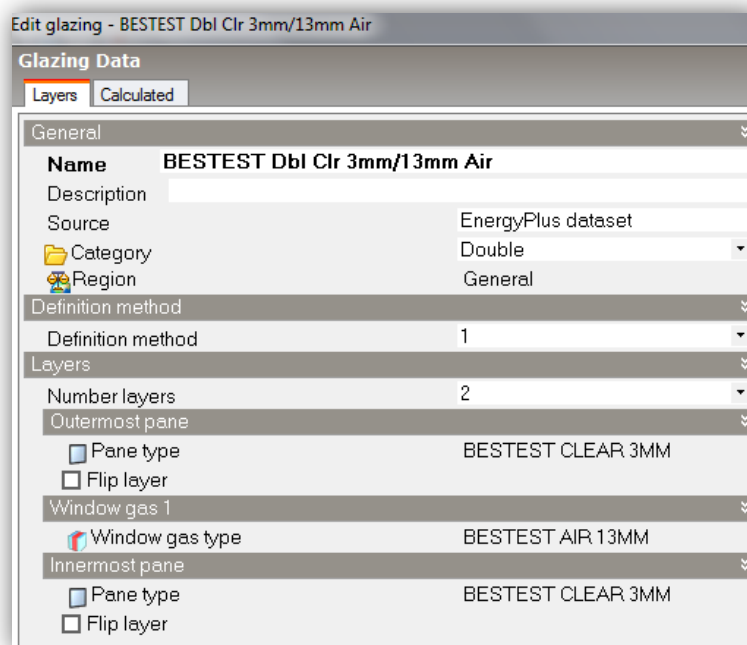


Figura 23 – Edição do tipo de envidraçado

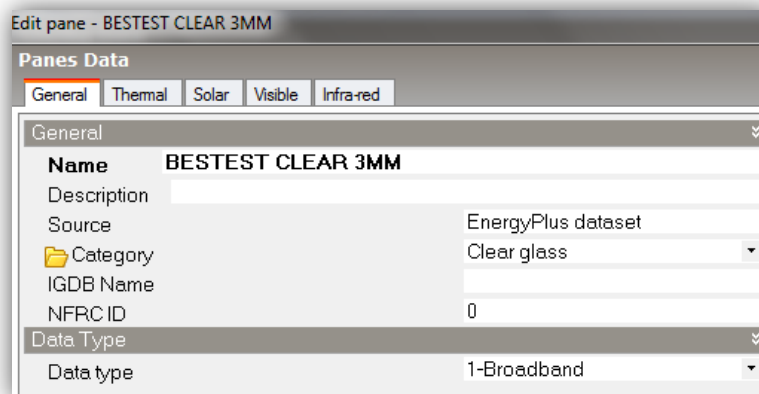


Figura 24 – Edição do tipo de material (Vidro)

Após se ter introduzido todas as características dos elementos construtivos, é necessário definir os parâmetros relacionados com os equipamentos AVAC a utilizar, uma vez que o método BEStest que se está a utilizar não é *FF – Free Floating*, logo há a necessidade de configurar estas definições.

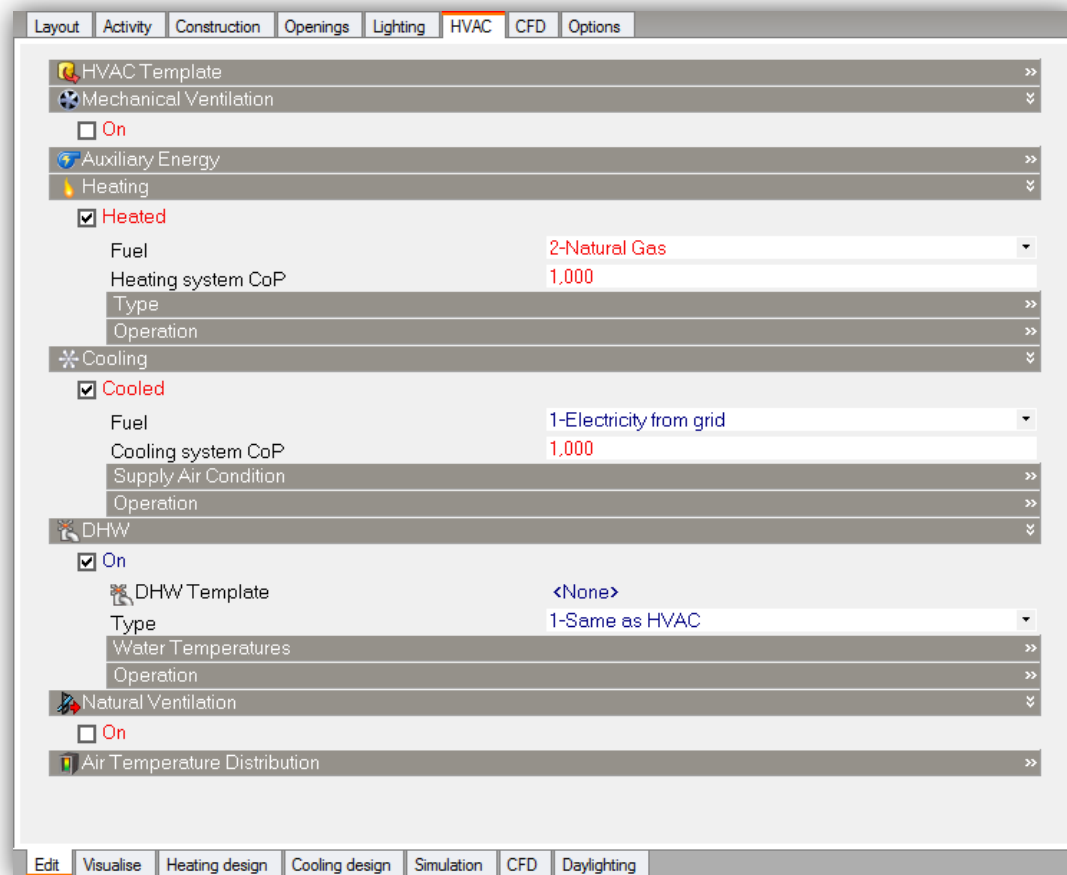


Figura 25 – Configurações HVAC

Na Figura 25 é possível observar como estão configuradas as definições HVAC para o modelo BEStest 900. De destacar que qualquer tipo de ventilação, seja natural ou mecânica está desligada, contudo, na Figura 20 pode-se observar que estão definidas 0,5 renovações do ar por hora (*ac/h – air change/hour*). Os equipamentos de aquecimento e de arrefecimento têm ambos um COP (*Coefficient Of Performance*) de 1.

2.2.4. RESULTADOS DO MÉTODO BESTEST 900 NO DESIGNBUILDER E COMPARAÇÃO

De seguida são apresentados os resultados relativos às simulações do modelo BEStest 900 no DesignBuilder na Figura 26 e Figura 27, e posteriormente são apresentados os resultados esperados das simulações deste modelo para o projeto de aquecimento na Figura 29 e para o projeto de arrefecimento na Figura 30.

End Uses						
	Electricity [kWh]	Natural Gas [kWh]	Other Fuel [kWh]	District Cooling [kWh]	District Heating [kWh]	Water [m3]
Heating	0.00	0.00	0.00	0.00	1163.68	0.00
Cooling	0.00	0.00	0.00	2685.45	0.00	0.00
Interior Lighting	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Lighting	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interior Equipment	1752.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Equipment	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fans	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pumps	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Rejection	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Humidification	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Recovery	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Water Systems	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Refrigeration	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Generators	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total End Uses	1752.00	0.00	0.00	2685.45	1163.68	0.00

Figura 26 – Resultados BEStest900 sem isolamento no pavimento

End Uses						
	Electricity [kWh]	Natural Gas [kWh]	Other Fuel [kWh]	District Cooling [kWh]	District Heating [kWh]	Water [m3]
Heating	0.00	0.00	0.00	0.00	1128.54	0.00
Cooling	0.00	0.00	0.00	2737.31	0.00	0.00
Interior Lighting	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Lighting	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interior Equipment	1752.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Equipment	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fans	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pumps	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Rejection	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Humidification	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Recovery	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Water Systems	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Refrigeration	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Generators	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total End Uses	1752.00	0.00	0.00	2737.31	1128.54	0.00

Figura 27 – Resultados BEStest900 com isolamento no pavimento

High Mass Heating and Cooling	
Test Case	900
Annual Heating (MWh)	
Minimum	1.170
Maximum	2.041
Average	1.649
Energy Plus	1.164
DesignBuilder v 2.1	1.163
DesignBuilder v3.1	1.164
Difference, %	-29%
DesignBuilder within Range	NO
Annual Cooling (MWh)	
Minimum	2.132
Maximum	3.669
Average	2.826
Energy Plus	2.683
DesignBuilder v 2.1	2.683
DesignBuilder v3.1	2.683
Difference, %	-5%
DesignBuilder within Range	YES

Figura 28 – Resultados esperados do modelo BEStest900[3]

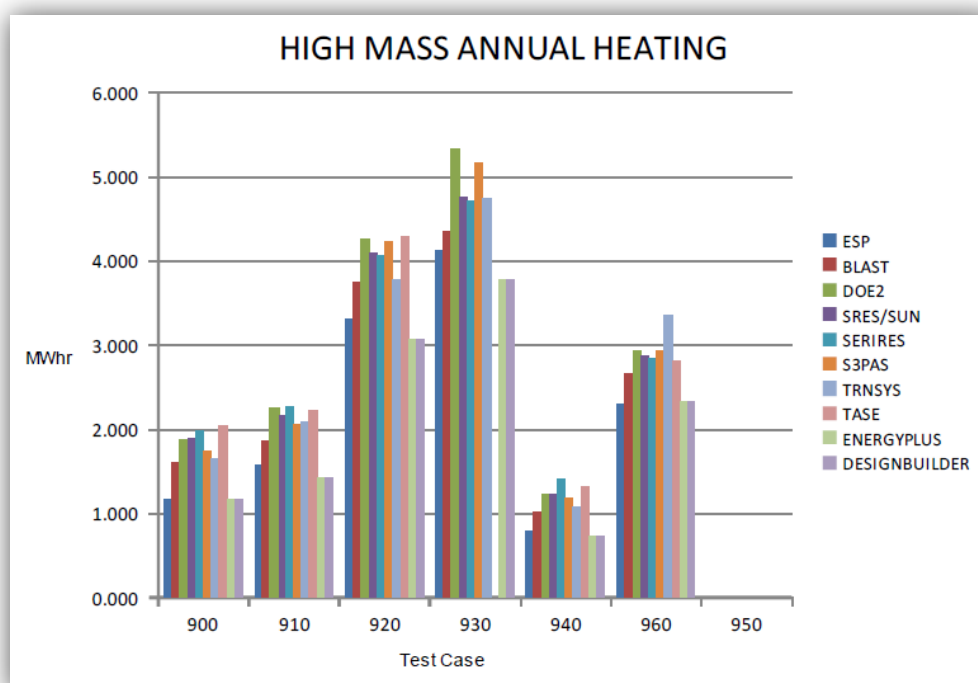


Figura 29 – Resultados esperados para Projeto de Aquecimento[3]

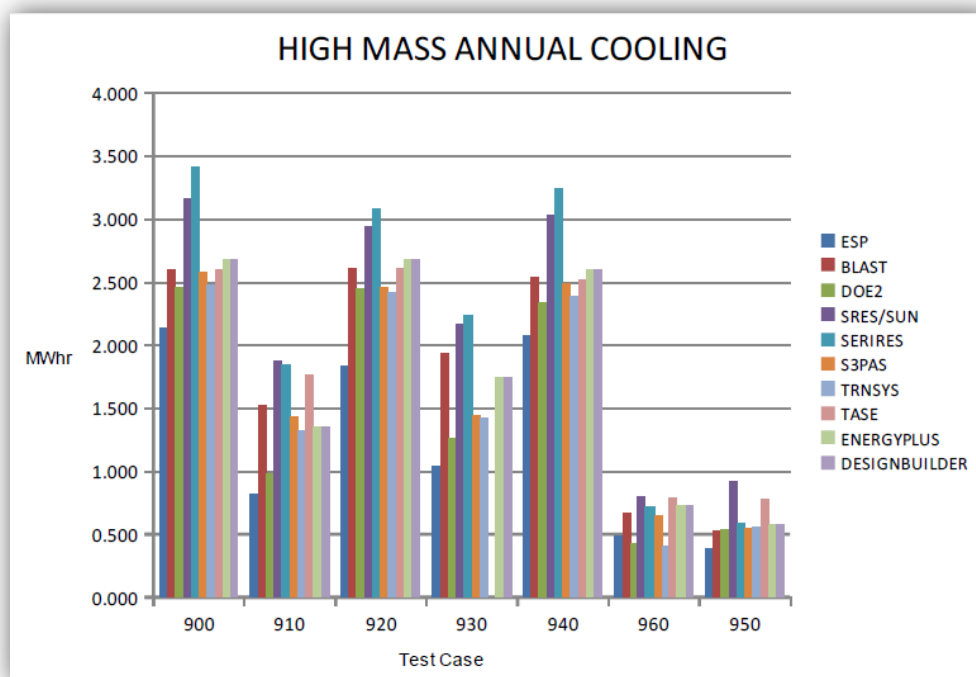


Figura 30 – Resultados esperados para Projeto de Arrefecimento[3]

Analisando os resultados obtidos no DesignBuilder, simulando o BEStest 900 sem e com isolamento no pavimento, conclui-se que as diferenças obtidas nos consumos energéticos anuais não são significativas, existindo uma variação positiva de 51.86 kWh nos gastos para arrefecimento, e uma variação negativa de 35.14 kWh nos gastos de aquecimento, comparando o modelo sem isolamento e com isolamento no pavimento. Comparando a soma total de gastos (aquecimento e arrefecimento) esta variação é de apenas 16.72 kWh, havendo maior consumo de energia na simulação em que se utilizou o isolamento no pavimento.

3

MODELAÇÃO DE EQUIPAMENTOS NO DESIGNBUILDER

3.1. EQUIPAMENTOS DE AQUECIMENTO/ARREFECIMENTO

3.1.1. CALDEIRAS

“As caldeiras são dispositivos que transferem energia química armazenada nos combustíveis para energia térmica de um fluido de trabalho, por norma água”[9].

As caldeiras murais utilizadas em habitação são de pequena potência e permitem aquecimento central e produção de água quente sanitária.



Figura 31 – Caldeira[10]

O rendimento das caldeiras traduz-se através da seguinte equação:

$$\eta_{cald} = \frac{\text{Calor fornecido ao fluido}}{\text{Calor fornecido pelo combustível}} = \frac{Q_{fluido}}{m_{comb} \cdot PCI} \quad (4)$$

m_{comb} = MASSA DE COMBUSTÍVEL [KG]

PCI = PODER CALORÍFICO INFERIOR DO COMBUSTÍVEL $\left[\frac{KJ}{Kg} \right]$

3.1.2. MÁQUINAS FRIGORÍFICAS E BOMBAS DE CALOR

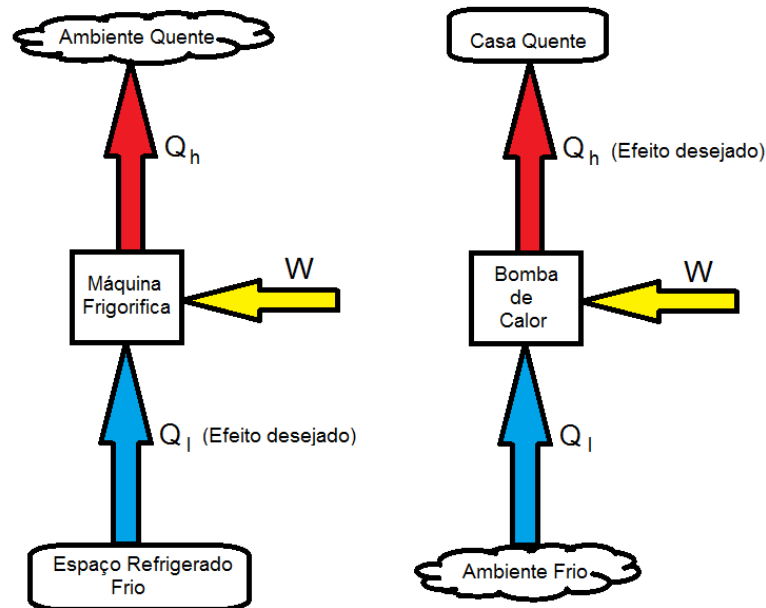


Figura 32 – Esquema de funcionamento de Máquinas Frigoríficas e Bombas de Calor

Sob o ponto de vista termodinâmico, uma máquina frigorífica e uma bomba de calor são a mesma coisa, pois retiram calor de um ambiente e transportam-no para outro ambiente, à custa de um equipamento que consome energia. Ambos os sistemas têm como base o ciclo de Carnot. Contudo, desempenham funções diferentes pois, uma máquina frigorífica tem como objetivo primordial arrefecer um determinado ambiente, retirando calor deste, enquanto que uma bomba de calor tem como objetivo aquecer um determinado ambiente, fornecendo calor para o mesmo. Na Figura 32 podemos compreender melhor o princípio de funcionamento de cada um destes equipamentos.

Os Ciclos de compressão são constituídos por 4 componentes distintos:

- Compressor
- Condensador
- Válvula de Expansão
- Evaporador

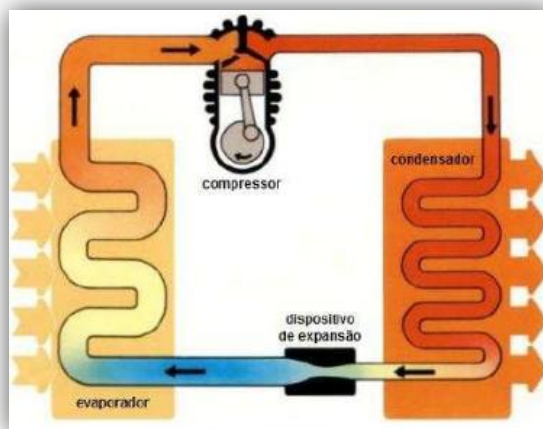


Figura 33 - Ciclo de Compressão [20]

O compressor aumenta a pressão do fluido intermédio por compressão do mesmo, o que aumenta também a sua temperatura. Por sua vez, este fluido vai entrar no condensador sob a forma de vapor de alta pressão, cede calor e vai sair do condensador como um líquido de alta pressão. Este líquido vai passar pela válvula de expansão, que vai reduzir a pressão no líquido, assim como a temperatura deste. Quando este líquido de baixa pressão entra para o evaporador, vai absorver calor e sair sob a forma de vapor de baixa pressão.

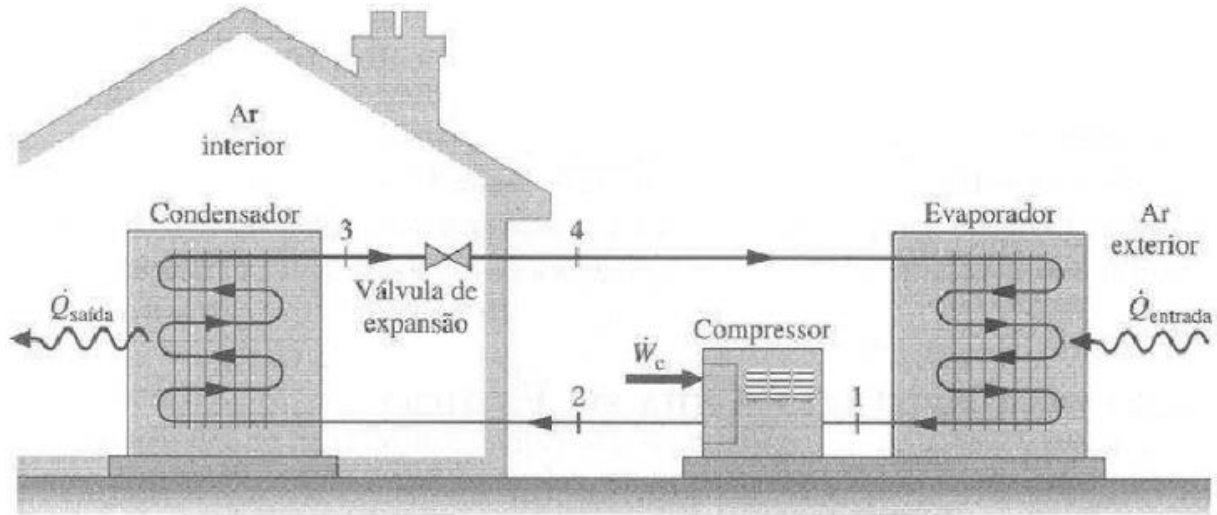


Figura 34 - Esquema de equipamento com ciclo de compressão

3.1.3. EFICIÊNCIA DE MÁQUINAS FRIGORÍFICAS E BOMBAS DE CALOR

A eficiência de uma bomba de calor é expressa pelo seu número *COP* – *Coefficient Of Performance*. Este valor, η_H , é traduzido por um número no intervalo [0,1] sendo 1 o seu máximo, que significa que o equipamento está a funcionar a potência ‘infinita’. Este é calculado segundo a expressão:

$$COP = \frac{\text{Potência Calorífica}}{\text{Potência Eléctrica Consumida}} = \frac{Q_{output}}{W_{input}} = \eta_H \frac{T_H}{T_H - T_{ext}} \quad (5)$$

Uma bomba de calor pode ser utilizada também como máquina frigorífica, sendo necessário inverter o seu ciclo de trabalho para funcionar como tal. Para calcular a eficiência de uma bomba de calor que funciona como uma máquina frigorífica podemos utilizar o número *COP* ou então o *EER* – *Energy Efficiency Ratio*:

$$EER/COP = \frac{Q_{output}}{W_{input}} = \eta_C \frac{T_C}{T_{ext} - T_C} \quad (6)$$

As bombas de calor têm várias fontes de calor utilizáveis:

- Solo
- Água
- Ar

As bombas que utilizam o solo como fonte de calor são mais estáveis, uma vez que as que utilizam água correm o risco de congelar em climas mais frios e as que utilizam o ar apenas são aceitáveis em climas moderados, apresentando um custo de instalação inferior aos restantes. O fluido de permuta que existe no sistema, poder ser água ou ar.

3.1.4. UNIDADES TERMINAIS

É necessário a existência de unidades terminais para a transmissão final do calor ao ambiente de destino. Estas unidades terminais, ou sistemas de emissão, podem ser:

- Radiadores ⇒ Aquecimento apenas
- Ventiloconvectores ⇒ Aquecimento e Arrefecimento
- Pavimento Radiante ⇒ Aquecimento e Arrefecimento
- Instalações com ar ⇒ Aquecimento e Arrefecimento



Figura 35 – Radiador, Ventiloconvector, Pavimento Radiante e Instalações com ar

3.1.5. VENTILAÇÃO

“As exigências de ventilação são quantificadas com base em critérios de qualidade do ar interior e funcionamento de aparelhos a gás”[9].

Existem 3 tipos de ventilação em habitações: ventilação natural, ventilação mecânica e ventilação híbrida. Inicialmente vai-se começar por abordar a ventilação natural.

A ventilação natural pode ocorrer de duas maneiras possíveis:

- Ação do vento que provoca variações de pressão no edifício
- Efeito chaminé que é induzido pela subida do ar quente que posteriormente é expelido para o exterior, o que provoca a entrada de ar das zonas inferiores.

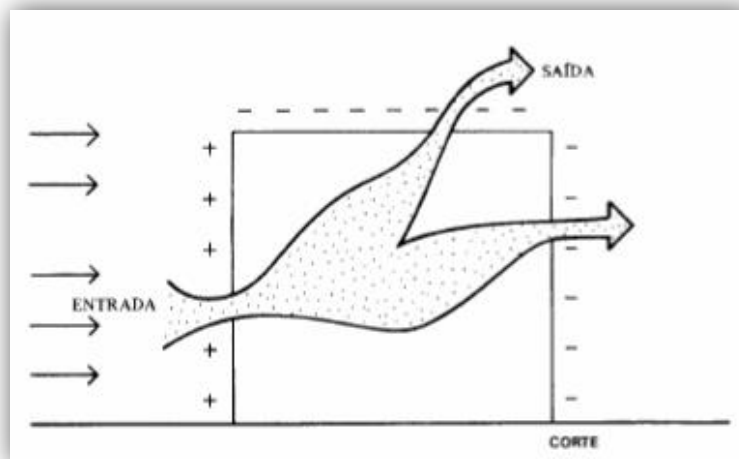


Figura 36 – Ventilação Natural Ação do Vento[11]

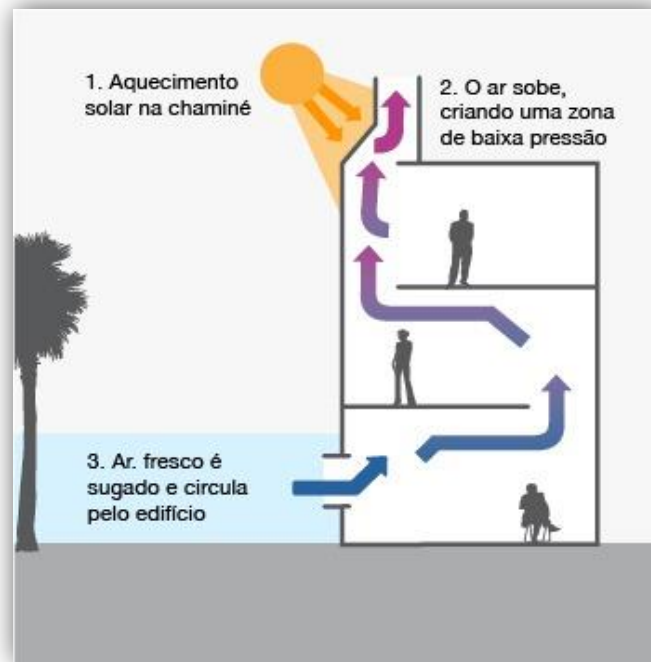


Figura 37 – Ventilação Natural Efeito Chaminé[12]

A ventilação mecânica pode ser dividida em 3 categorias:

- Insuflação mecânica, quando se insufla ar para o interior, que de certa forma expelle o ar interior que aí havia;
- Extração mecânica, quando se extrai o ar, o que cria uma zona de baixa pressão, fazendo com que entre ar do exterior
- Sistema balanceado (Insuflação e Extração)

3.2. TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO

Uma transferência de calor por convecção corresponde à condução de calor devido ao movimento de moléculas em fluídos, sejam eles líquidos ou gases.

Este fenómeno não pode ocorrer em sólidos uma vez que nestes não existem fluxos de movimento de moléculas.

A convecção caracteriza-se pelo transporte de massa através do movimento de um fluido devido à sua diferença de densidade, especialmente por meio de calor [16].

A transmissão de calor é realizada quando uma determinada massa de um fluido é aquecida, o que faz com que as suas moléculas constituintes se movam rapidamente e afastando-se umas das outras. Desta forma, essa determinada massa torna-se menos densa, uma vez que o seu volume aumenta devido ao afastamento das moléculas. Uma vez que esta massa se torna menos densa, vai sofrer um movimento ascendente, e de igual modo, outra massa que esteja a uma temperatura menor vai sofrer um movimento descendente. Desta forma criam-se correntes de convecção, que vão contribuir para aquecer a totalidade de fluido existente no local.

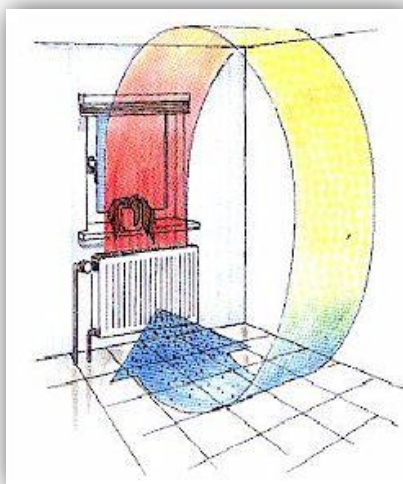


Figura 38 – Corrente de convecção devido a um radiador [17]

3.3. TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR RADIAÇÃO

Transmissão de calor sob a forma de radiação consiste na emissão de uma determinada onda eletromagnética pertencente ao espectro eletromagnético (Figura 43).

Qualquer corpo com uma temperatura superior a 0 Kelvin ($-273,15^{\circ}\text{C}$) emite radiação térmica [18]. As características da radiação térmica dependem de:

- Propriedades da superfície irradiante
- Temperatura
- Capacidade de absorção
- Poder de emissividade

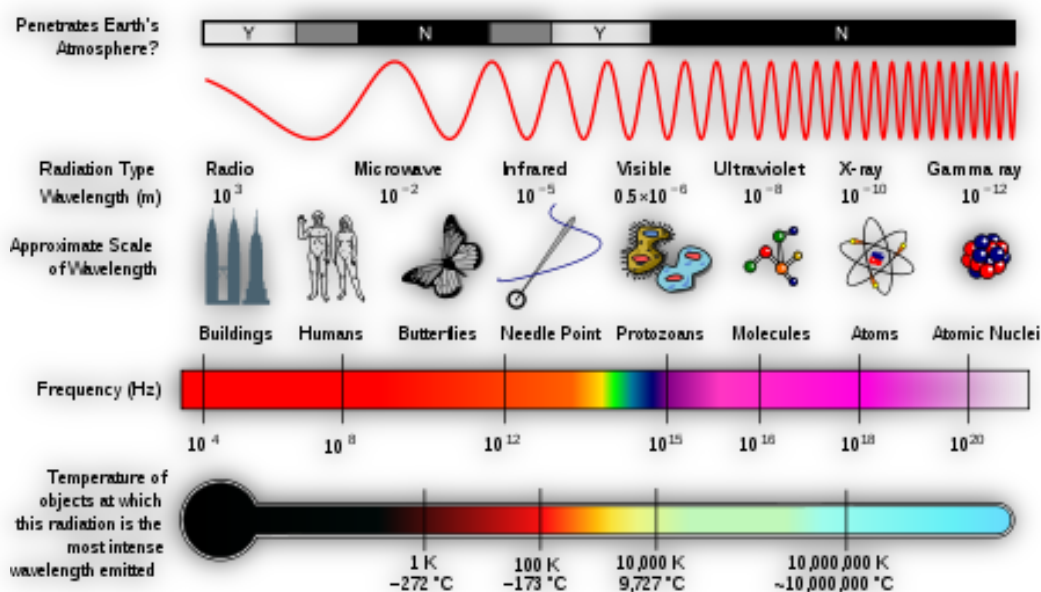


Figura 39 – Espectro eletromagnético [19]

No modelo que vai ser utilizado para realizar as simulações, irão haver transferências de calor por convecção através do ar, e também irá haver transferências de calor por radiação mais propriamente, radiação emitida pelas paredes, pavimento, teto e envidraçados, já que todos estes componentes se encontram sempre a temperaturas superiores a $-273,15^{\circ}\text{C}$.

3.4. CALDEIRA + RADIADOR (BOILER + RADIATOR)

Existem três formas de introdução de equipamentos no Designbuilder[1], nomeadamente o método simples, compacto e detalhado. Como neste trabalho apenas se pretende introduzir equipamentos relativamente simples, optou-se pelo primeiro, uma vez que os restantes exigem um conhecimento mais profundo do funcionamento dos equipamentos.

Para introduzir um sistema de equipamentos HVAC do tipo caldeira + radiador, escolhe-se o separador HVAC (Figura 11) no programa, e de seguida abre-se a lista de modelos de sistemas equipamentos já introduzidos no DesignBuilder na secção *Template*. A lista de equipamentos existentes na biblioteca do DesignBuilder é a que se pode ver na figura seguinte.

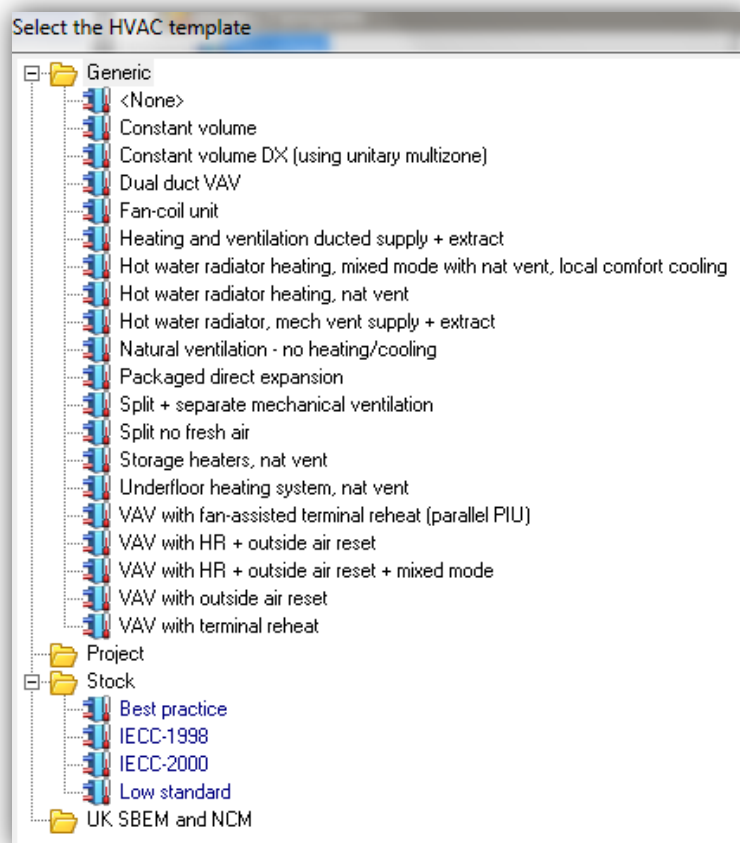


Figura 40 – Lista de equipamentos HVAC existente na biblioteca do DesignBuilder

De seguida seleciona-se o sistema de equipamento “*Hot water radiator heating, nat vent*”, que corresponde a um sistema em que o aquecimento é realizado a partir de uma caldeira ligada a um radiador, e a ventilação é feita de forma natural, sem recurso a outros equipamentos.

Após se ter escolhido o modelo do equipamento, pode-se ainda selecionar o seu *COP*, bem como o tipo de funcionamento e o tipo de combustível utilizado pelo equipamento. Também é possível definir o número de renovações horárias de ar da ventilação natural. Este modelo está configurado no

programa para uma zona aberta de escritórios, pelo que o tipo de funcionamento do equipamento é para um período de 5 dias por semana, ou seja, de Segunda-feira a Sexta-feira, com um período de pré-aquecimento de 1 hora. Este equipamento está definido para funcionar durante o ano inteiro, e não apenas para um funcionamento sazonal no período de aquecimento. Todos os valores apresentados na Figura 39 são valores que estão introduzidos no modelo, e que funcionam apenas como um exemplo de aplicação, uma vez que os valores a ser utilizados nas simulações vão ser apresentados numa fase mais avançada deste trabalho.

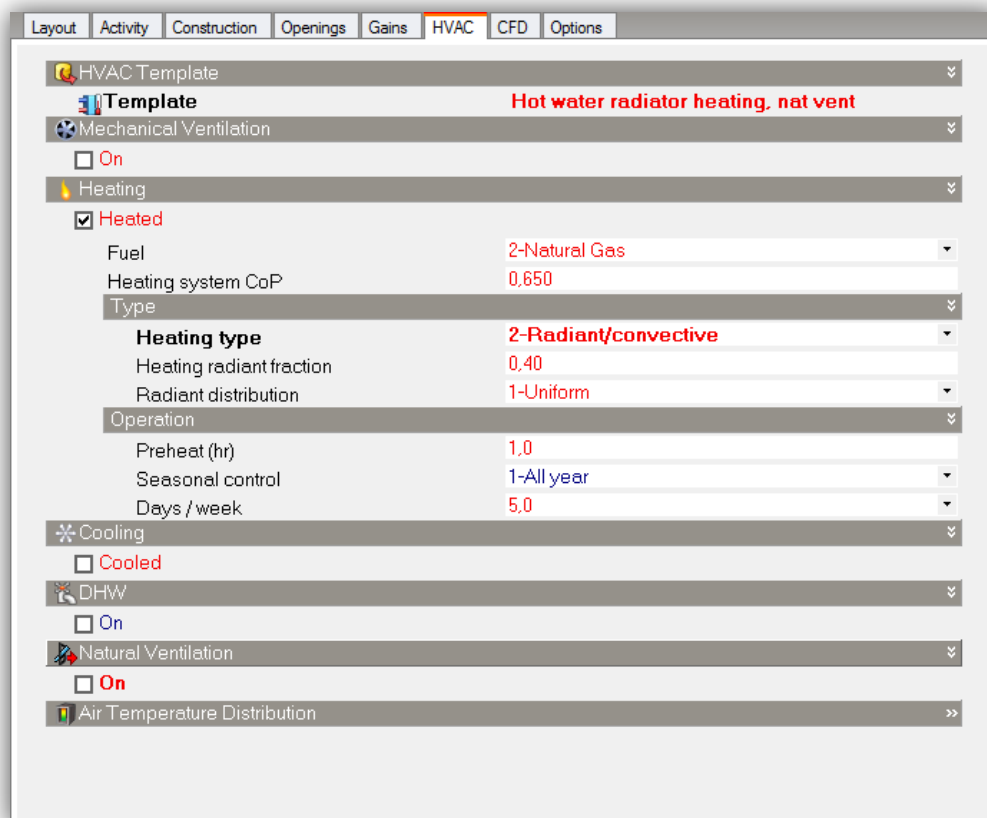


Figura 41 – Separador HVAC do modelo caldeira + radiador

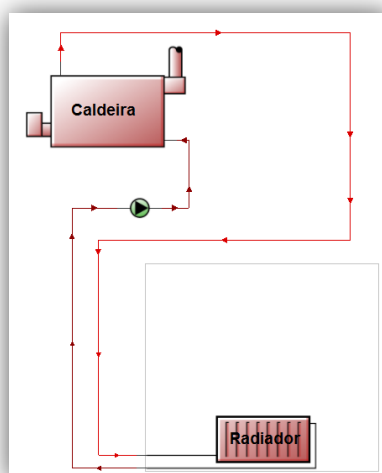


Figura 42 – Esquema de funcionamento do sistema caldeira + radiador

3.5. BOMBA DE CALOR (CHILLER + SPLIT)

Este sistema de equipamentos (Chiller+Split) é o único que funciona tanto para aquecimento como para arrefecimento. Neste caso, o sistema de equipamentos permite não só aquecer o ar, como também arrefecer, podendo ser utilizado ao longo do ano, enquanto o anterior apenas poderia ser utilizado no período de aquecimento.

Para introduzir este modelo no programa, na lista de equipamentos disponíveis da biblioteca (Figura 38), seleciona-se o sistema de equipamentos “*Split no fresh air*”. Este equipamento corresponde a um sistema em que não existem trocas de ar com o exterior, e o aquecimento/arrefecimento do ar interior dá-se através da troca de calor com um fluido friogénico que está em circulação entre o *chiller* localizado no exterior e o *split* instalado no interior da habitação. De igual forma, também é possível definir o *COP* do equipamento, assim como o tipo de combustível e tipo de funcionamento.

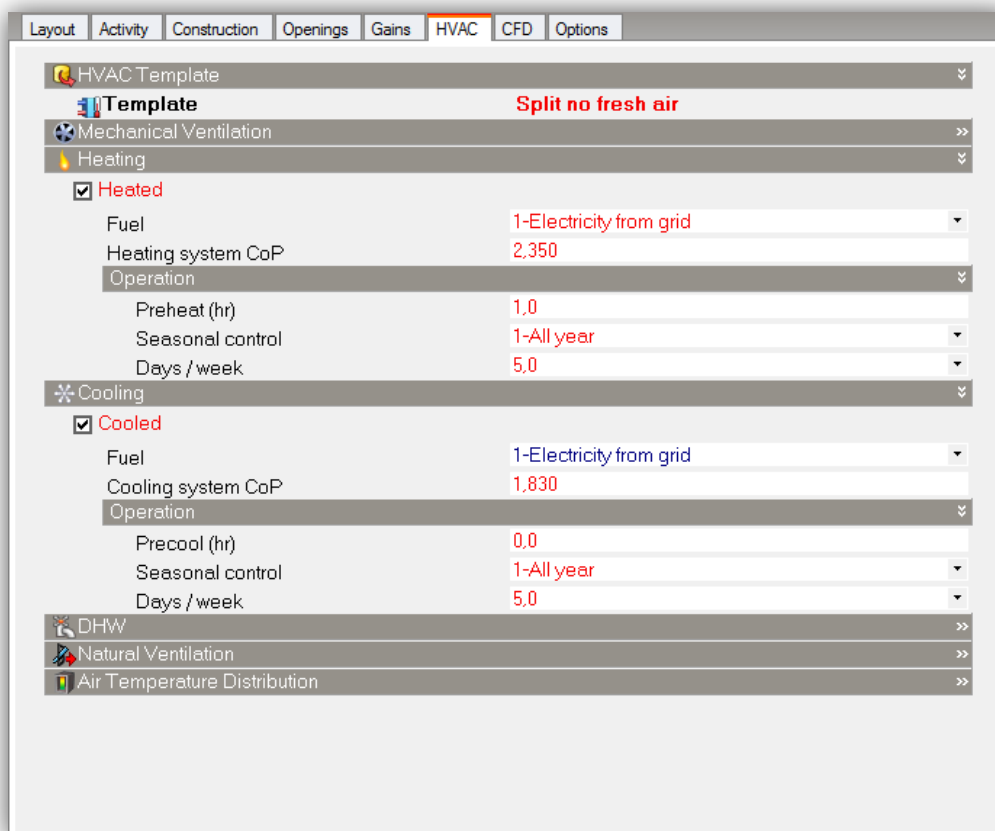


Figura 43 – Separador do modelo Chiller + Split

Todos os valores apresentados na Figura 41 são valores que estão introduzidos no modelo, e que funcionam apenas como um exemplo de aplicação, os valores a utilizar nas simulações definidas para este trabalho serão apresentadas no capítulo seguinte.

4

SIMULAÇÕES

4.1. DESCRIÇÃO DAS SIMULAÇÕES

4.1.1. PARÂMETROS COMUNS

As simulações que irão ser realizadas neste trabalho têm o objetivo de avaliar o comportamento energético de 2 tipos de sistemas de equipamentos diferentes, já anteriormente descritos no capítulo 3, sendo estes:

- Caldeira + Radiador (Boiler + Radiator);
- Bomba de Calor (Chiller + Split)

As simulações vão ser divididas em 3 cenários possíveis:

- A - Cenário Inicial
- B - Cenário Inicial + Proteção Solar com estore pelo exterior
- C - Cenário Inicial + Proteção Solar com estore pelo exterior + Aquecimento Intermitente

Existem certos aspetos comuns que irão ser aplicados a todas as simulações de cada cenário, estando esses parâmetros definidos na tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros característicos do Cenário Inicial

Parâmetros Comuns	
Atividade	
Categoria:	Espaço Residencial
Férias:	Não
Ganhos:	4 w/m ²
Controlo de Temperatura	
Aquecimento	
Setpoint:	20°C
Set Back:	20°C
Arrefecimento	
Setpoint:	25°C

Set Back:		25°C	
Construção			
Tabelas 1, 2, 3 e 4			
Infiltração		0,800 ac/h	
Aberturas			
Janelas exteriores	Cenário A	Cenário B	Cenário C
Proteção Solar	Desligado	Ligado	Ligado
Tipo		Com ripas de refletividade média	Com ripas de refletividade média
Posição		Pelo exterior	Pelo exterior
Controlo		Sempre ligado	Sempre ligado
Janelas no teto	Não	Não	Não
Portas	Não	Não	Não
HVAC			
Operação			
Horário	00:00 – 24:00	00:00 – 24:00	18:00 – 00:00

A diferença entre os 3 cenários está nos parâmetros relativos à proteção solar e ao funcionamento dos sistemas de climatização. No Cenário A não existe qualquer tipo de proteção solar, e o funcionamento dos equipamentos é contínuo. No Cenário B, existe proteção solar exterior com ripas de refletividade média sempre ativas, e o funcionamento dos equipamentos também é contínuo. No Cenário C, existe proteção solar exterior com ripas de refletividade média sempre ativas, e o funcionamento dos equipamentos é intermitente, ou seja, estes apenas são ligados entre as 18:00 e as 00:00, todos os dias.

4.1.2. CENÁRIOS

Portugal Continental é dividido em três zonas climáticas de Inverno e três zonas climáticas de Verão.

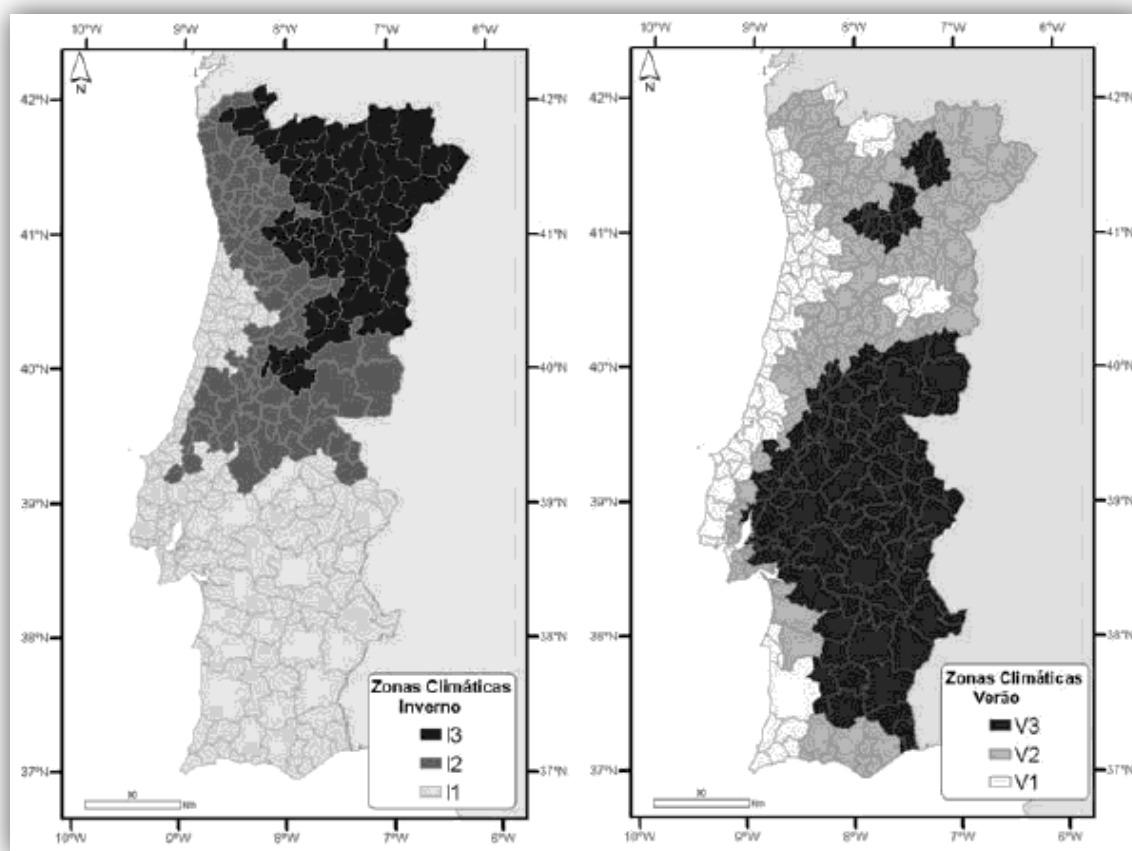


Figura 44 – Zonas Climáticas de Portugal (Inverno à esquerda e Verão à direita) [15]

Analisando a Figura 44, relativamente às zonas climáticas de Inverno, constata-se que aproximadamente metade de Portugal Continental se situa numa zona de Inverno de nível 1, principalmente nas zonas Sul e Centro, mas também grande parte da zona litoral. A zona com um nível de severidade maior, nível 3, localiza-se a Nordeste e propaga-se um pouco mais para baixo, ao longo da fronteira com Espanha. A zona climática de Inverno de nível 2 verifica-se entre as duas anteriores, e também na zona litoral desde a fronteira com Espanha, até cerca da zona de Aveiro.

Quanto às zonas climáticas de Verão, o litoral está praticamente todo introduzido numa zona climática de nível 1, exceto na zona do Algarve, que a maioria pertence à zona de nível 2. A zona de nível mais severo, nível 3, verifica-se principalmente na zona do Alentejo e Interior e também em algumas zonas do Norte interior. As zonas de nível 2 encontram-se principalmente na zona Nordeste e Centro.

Na tabela 6, apresentada em baixo, estão representadas as características de cada concelho de Portugal selecionado para análise, de modo a poder comparar o comportamento dos equipamentos em cada ambiente.

Estes concelhos foram selecionados por forma a englobarem, no seu conjunto, todos os tipos de zonas climáticas existentes em Portugal, tanto a nível de Zona Climática de Inverno como de Verão de modo a englobar a totalidade de climas existentes em Portugal Continental.

Tabela 6 – Concelhos em análise

Concelho	Zona Climática de Inverno	Zona Climática de Verão	Duração da estação de aquecimento (meses)	Temperatura externa do projeto (°C)	Amplitude Térmica (°C)
Bragança	I ₃	V ₂	8	33	15
Évora	I ₁	V ₃	5,7	35	17
Lisboa	I ₁	V ₂	5,3	32	11
Portalegre	I ₂	V ₃	6,7	34	14
Porto	I ₂	V ₁	6,7	30	9

Também está representado na tabela anterior a duração da estação de aquecimento, pois esta irá influenciar os resultados do comportamento energético do equipamento em análise, já que um maior período da estação de aquecimento vai traduzir-se também numa maior duração do funcionamento dos equipamentos de aquecimento, e uma redução do funcionamento dos equipamentos de arrefecimento, e como estes equipamentos não têm consumos exatamente iguais, vai levar a resultados diferentes do que se a duração da estação de aquecimento fosse constante em todos os concelhos.

A temperatura externa de projeto, assim como a amplitude térmica, também vão ter influência nos resultados, pois quanto maior a temperatura, mais consumo de energia vai haver para arrefecer, e no caso da amplitude térmica, se esta for muito elevada, também se irá traduzir num gasto de energia mais elevado, por forma a manter a temperatura interior dentro de um intervalo de conforto mais restringido.

De seguida são apresentadas as tabelas correspondentes aos cenários que irão ser alvo de simulação e análise ao longo deste trabalho. Associou-se cada cidade a cada um dos sistemas de equipamentos, de modo a comparar os resultados energéticos entre eles.

Tabela 7 – A - Cenário Inicial

Equipamento 1: Caldeira + Radiador		Equipamento 2: Ar Condicionado + Split	
A.1.1	Bragança	A.2.1	Bragança
A.1.2	Évora	A.2.2	Évora
A.1.3	Lisboa	A.2.3	Lisboa
A.1.4	Portalegre	A.2.4	Portalegre
A.1.5	Porto	A.2.5	Porto

Tabela 8 – B - Cenário Inicial + Proteção Solar com estore pelo exterior

Equipamento 1: Caldeira + Radiador		Equipamento 2: Ar Condicionado + Split	
B.1.1	Bragança	B.2.1	Bragança
B.1.2	Évora	B.2.2	Évora
B.1.3	Lisboa	B.2.3	Lisboa
B.1.4	Portalegre	B.2.4	Portalegre
B.1.5	Porto	B.2.5	Porto

Tabela 9 – C - Cenário Inicial + Proteção Solar com estore pelo exterior + Aquecimento Intermitente

Equipamento 1: Caldeira + Radiador		Equipamento 2: Ar Condicionado + Split	
C.1.1	Bragança	C.2.1	Bragança
C.1.2	Évora	C.2.2	Évora
C.1.3	Lisboa	C.2.3	Lisboa
C.1.4	Portalegre	C.2.4	Portalegre
C.1.5	Porto	C.2.5	Porto

4.2. PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

Por forma a facilitar a compreensão de como as simulações irão ser realizadas, irá ser feita uma descrição pormenorizada de uma simulação, assim como os seus resultados.

Relativamente à entrada de dados no DesignBuilder[1], é apresentada de seguida os parâmetros de simulação relativamente à cidade do Porto, e mais em concreto, ao equipamento Bomba de Calor (Chiller + Split).

Numa primeira fase, é necessário seleccionar a região onde se insere o modelo, para este caso como se pretende a cidade do Porto, definiu-se o clima existente com a designação “PORTO/PEDRAS RUBRAS” (Figura 5). Este clima existente na biblioteca do programa já tem todas as características climatéricas necessárias para o processo de cálculo das simulações.

Após seleccionarmos o tipo de clima, procede-se à implementação dos elementos construtivos, estando as características destes já descritos no Subcapítulo 2.2.2. e a sua implementação no Capítulo 2.3. pelo que não é necessário efetuar aqui uma descrição minuciosa, uma vez que já foi realizada anteriormente.

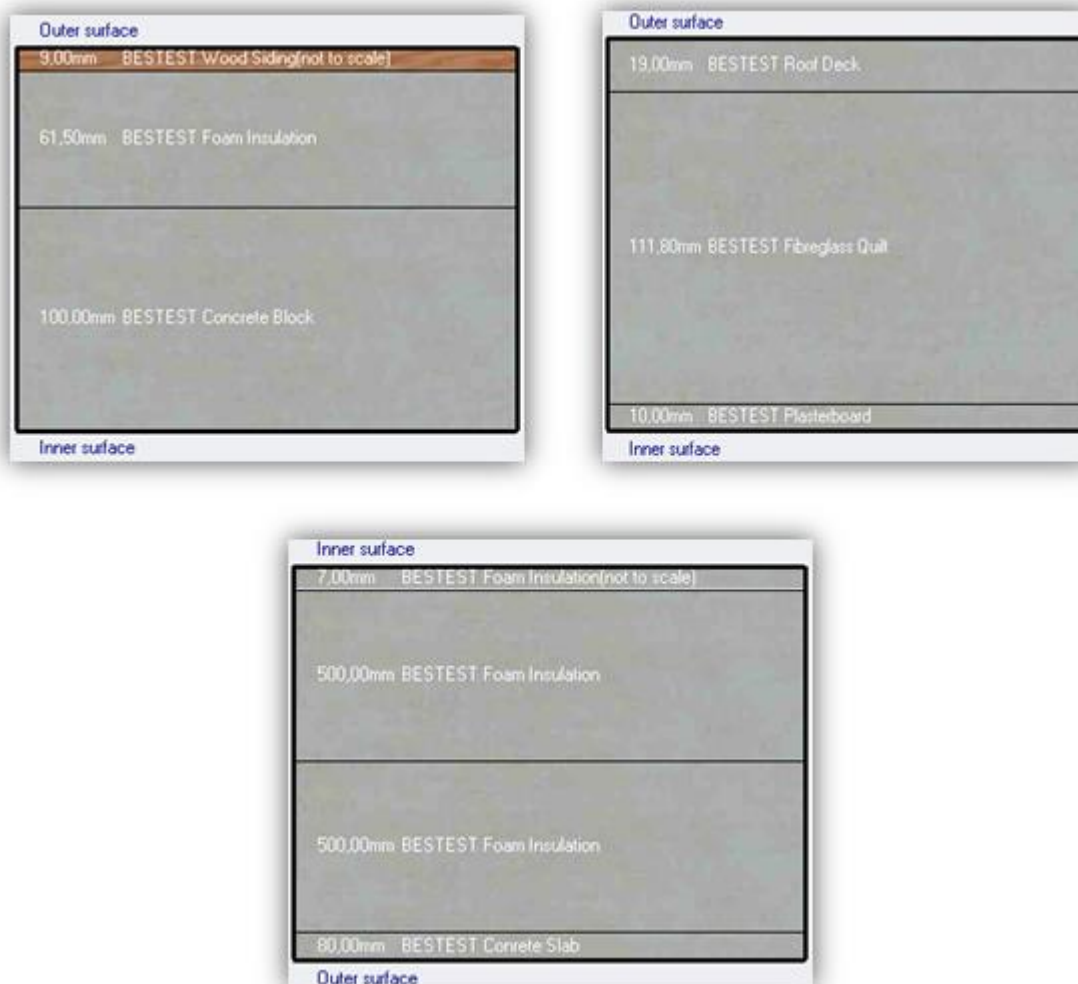


Figura 45 – Corte transversal da parede, teto e pavimento (pela ordem de apresentação)

De seguida é necessário implementar os parâmetros comuns a todas as simulações do cenário inicial, que estão definidos na Tabela 5. Estes parâmetros são introduzidos nos vários separadores de dados existentes no DesignBuilder[1], estando estes definidos na tabela pela ordem que aparecem no programa.

A implementação do equipamento Bomba de Calor (Chiller + Split) está descrita no Capítulo 3.5. com indicação das características possíveis de alteração.

Tabela 10 – Parâmetros HVAC

Parâmetros Bomba de Calor (Chiller + Split)	
Aquecimento	
Capacidade	Auto dimensionamento
Combustível	Electricidade
CoP	4
Tipo	Convectivo
Operação	
Pré-aquecimento	0 h
Controlo Sazonal	Anual
Dias/Semana	7
Arrefecimento	
Capacidade	Auto dimensionamento
Combustível	Electricidade
CoP	3
Operação	
Pré-arrefecimento	0 h
Controlo Sazonal	Anual
Dias/Semana	7
Águas Quentes Sanitárias	Desligado
Ventilação Natural	Desligado

4.3. RESULTADOS DETALHADOS PARA O PORTO

4.3.1. CENÁRIO SEM AQUECIMENTO/ARREFECIMENTO

Após termos feito a introdução de dados no programa, de acordo com o subcapítulo anterior, é realizada a simulação propriamente dita. Esta foi realizada para um período de 1 ano, e os resultados foram calculados de hora em hora, para um total de 8760 horas.

Numa primeira instância, os primeiros dados a apresentar são os referentes à temperatura de bolbo seco do Porto, ou seja, a temperatura exterior. Desta forma compreendemos melhor quais serão as necessidades principais por forma a atingir o conforto e obter uma análise mais concisa se o equipamento está a ter resultados positivos.

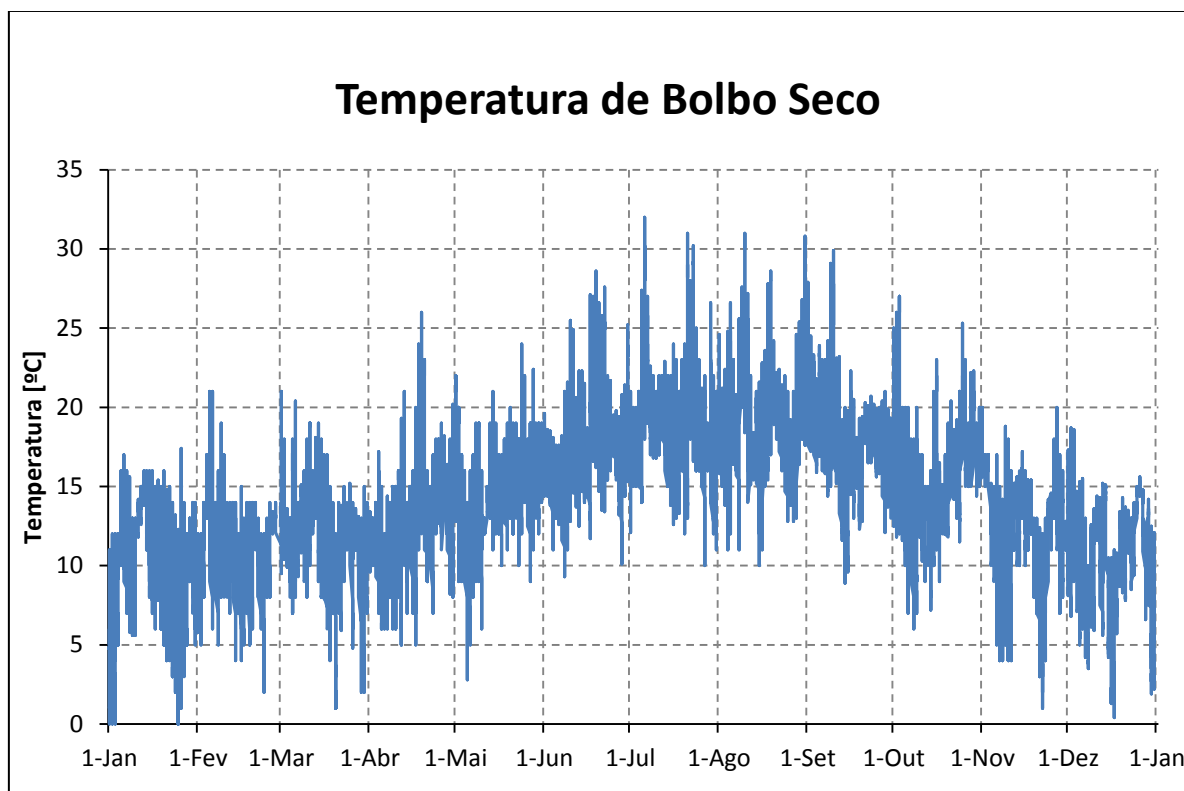


Figura 46 – Temperatura de Bolbo Seco do Porto

Analisando a Figura 46 constatamos que no Porto, no período de Verão as temperaturas são agradáveis, ou seja, não atingem valores muito elevados, sendo a temperatura máxima um pouco acima dos 30°C. No período de Inverno, as temperaturas já não são tão agradáveis como no Verão, havendo mesmo alturas em que estas baixam os 0°C. Contudo, pode-se caracterizar o clima do Porto como sendo um clima agradável, uma vez que, contando com os ganhos energéticos durante a estação de Inverno tais como ganhos solares através de envidraçados, por ocupação humana, iluminação, etc., as temperaturas nunca chegam a ser tão baixas como no exterior.

Após analisar a temperatura exterior na zona do Porto, vamos analisar a temperatura interior no modelo de cálculo, também para o Porto, mas sem a existência de nenhum equipamento de climatização.

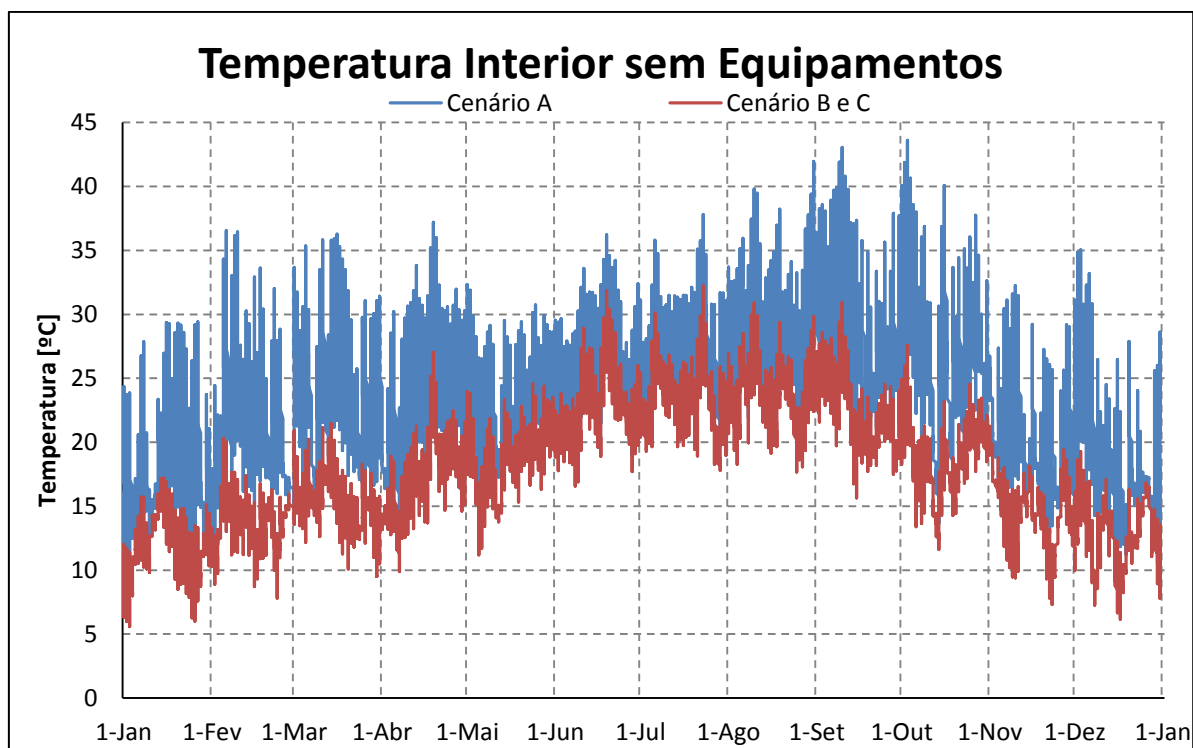


Figura 47 – Temperatura do ar sem equipamentos

Na Figura 47 podemos observar, que apesar de a temperatura exterior no Porto ser relativamente agradável, para o Cenário A dentro da habitação isto já não acontece, uma vez que em certos períodos do ano, como por exemplo em Agosto, Setembro e Outubro, as temperaturas praticamente que atingem os 45°C, uma temperatura que é bem inferior no exterior. Mas isto acontece devido aos ganhos solares principalmente através dos envidraçados, que faz com que a temperatura no interior aumente.

Também devido ao efeito dos ganhos de calor, uma vez que estes são positivos, ou seja, a quantidade de ganhos é superior às perdas registadas na habitação, verifica-se que a temperatura interior nunca baixa a fasquia dos 10°C, logo, no Inverno a temperatura interior da habitação nunca é tão severa como no exterior, pelo que se constata que é mais importante o período de arrefecimento do que o período de aquecimento na zona do Porto, já que durante grande parte do período de Inverno a temperatura interior oscila entre os 15°C e os 25°C, o que torna este período mais agradável do que o período de Verão, em que as temperaturas oscilam entre os 25°C e os 40°C.

Relativamente ao Cenário B e C, em que já existe proteção solar, verifica-se que as temperaturas no período de Verão são mais aceitáveis, já que o valor máximo se situa na zona dos 30°C. Contudo, na situação de Inverno, as temperaturas chegam a atingir os 5°C, temperaturas muito baixas e completamente fora dos limites de conforto, uma vez que não existem ganhos solares, devido à proteção solar, as temperaturas descem consideravelmente, durante todo o ano, face à mesma situação mas sem sombreamento.

Pode-se facilmente concluir, através da análise do gráfico anterior, que neste caso seria indispensável o recurso a sistemas de climatização, para que as temperaturas no interior da habitação tomem limites dentro da zona do conforto.

4.3.2. CENÁRIO COM AQUECIMENTO/ARREFECIMENTO POR BOMBA DE CALOR

De seguida é apresentada a Figura 48, relativa ao gráfico da temperatura interior da habitação do Cenário A com utilização do equipamento Bomba de Calor (Chiller + Split).

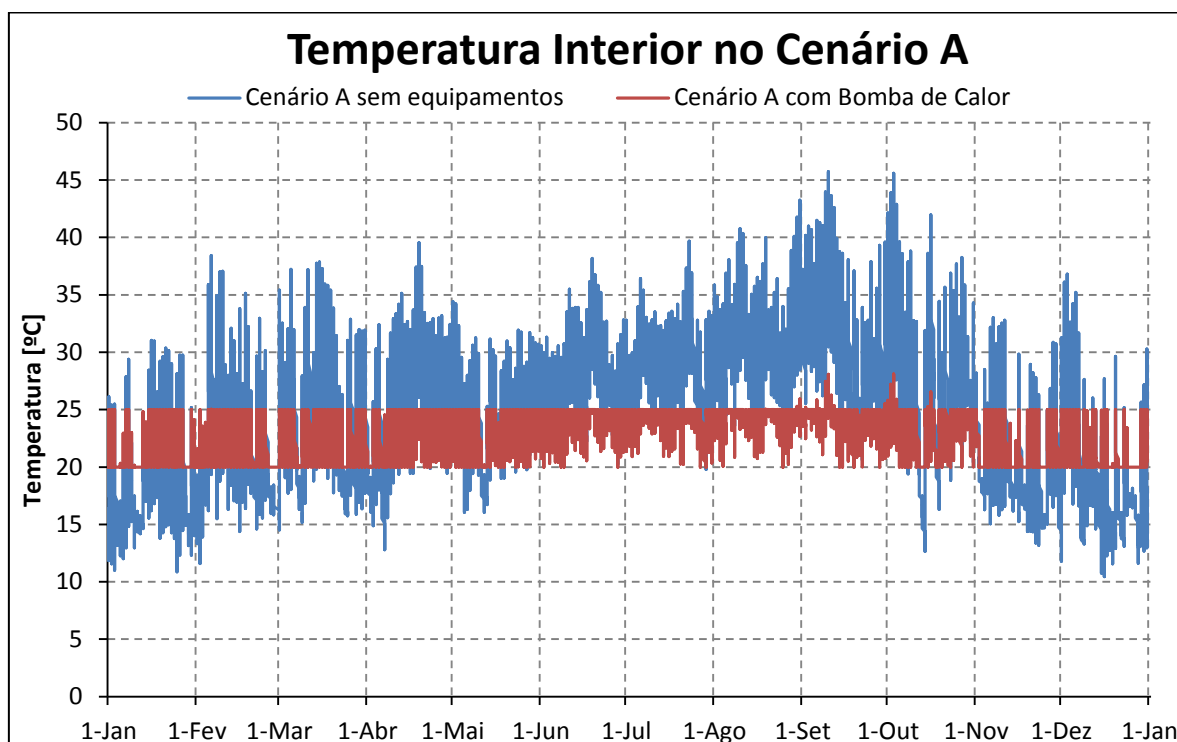


Figura 48 – Temperatura interior no Porto no Cenário A com Equipamento Bomba de Calor

Podemos observar que com a utilização do sistema de climatização Bomba de Calor (Chiller + Split), as temperaturas no interior da habitação, no período de Verão tornam-se muito mais agradáveis uma vez que andam sempre abaixo dos 25°C, exceto em raras exceções, mas não chegam a ultrapassar os 30°C e sem o sistema de climatização quase atingiam os 45°C. No período de Inverno, como este equipamento pode funcionar tanto para a estação de aquecimento, como para a de arrefecimento, podemos observar que as temperaturas se situam sempre acima dos 20°C, o que garante uma certa margem de conforto no interior da habitação. Este sistema de climatização garante uma temperatura no interior da habitação que flutua maioritariamente entre os 20°C e os 25°C, uma banda que certamente se situa na zona de conforto pois não atinge temperaturas muito elevadas nem temperaturas muito baixas, havendo uma amplitude de cerca de 5°C aproximadamente, durante todo o ano, no interior da habitação.

Analisando a figura podemos observar mais concisamente, que o sistema de climatização é requisitado para arrefecimento tanto no período de aquecimento como no período de arrefecimento, enquanto que a funcionalidade de aquecimento não é utilizada nos meses de Junho a Setembro (inclusive).

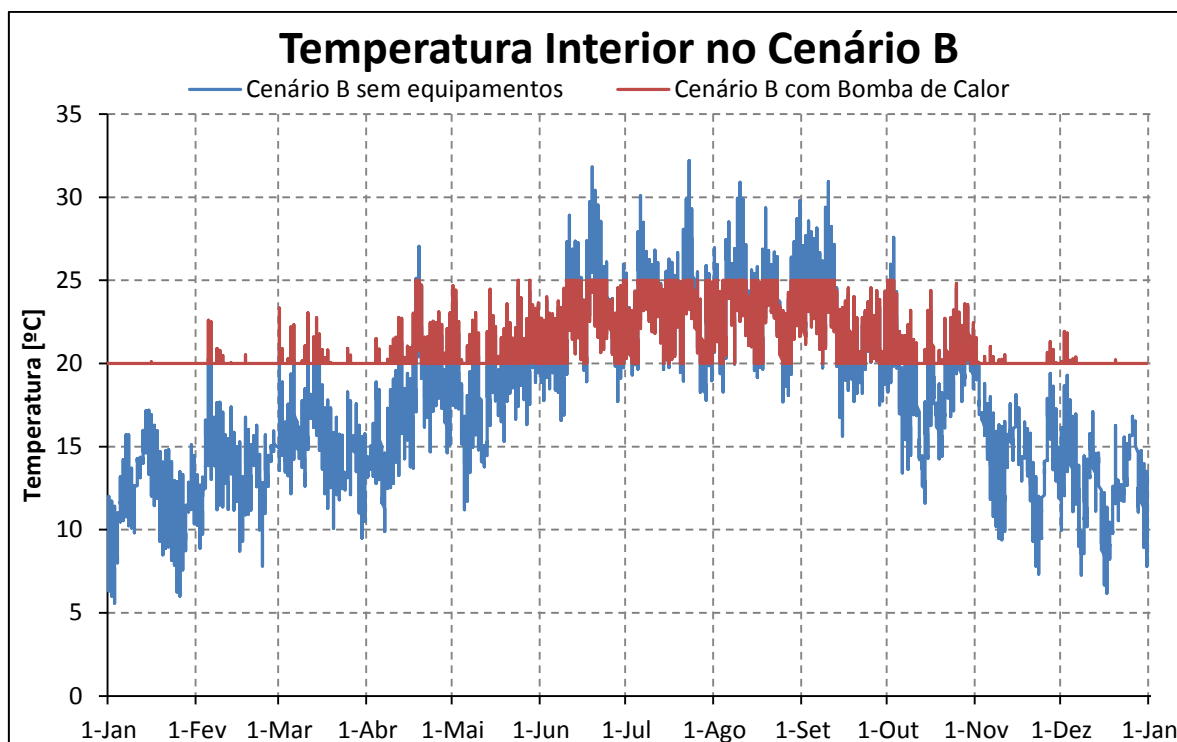


Figura 49 - Temperatura interior no Porto no Cenário B com Equipamento Bomba de Calor

Na Figura 49 estão representadas a temperatura interior da habitação para o Cenário B, sem qualquer equipamento, a azul, e com Bomba de Calor, a vermelho.

A colocação de proteção solar nos envidraçados é especialmente vantajosa na situação de Verão, uma vez que as temperaturas no interior da habitação são bastante inferiores do que quando não havia qualquer tipo de proteção solar. Contudo, para a situação de Inverno, não é muito conveniente utilizar proteção solar, pois os ganhos solares neste período são favoráveis uma vez que ajudam a elevar a temperatura interior da habitação e reduzir o recurso aos equipamentos de climatização.

As temperaturas no Inverno atingem valores mínimos na ordem dos 5°C, valores muito mais baixos do que quando não se utilizava qualquer tipo de proteção solar, que estavam na ordem dos 10°C, pelo que é necessário um maior funcionamento da Bomba de Calor neste período de maneira a atingir os 20°C definidos inicialmente.

No período de Verão as temperaturas atingem valores máximos na ordem dos 32°C, que comparativamente ao mesmo período para o Cenário A, em que estes atingiam valores na ordem dos 43°C, é significativamente vantajoso uma vez que requer um menor funcionamento da Bomba de Calor de maneira a atingir o valor de 25°C definido no *setpoint*.

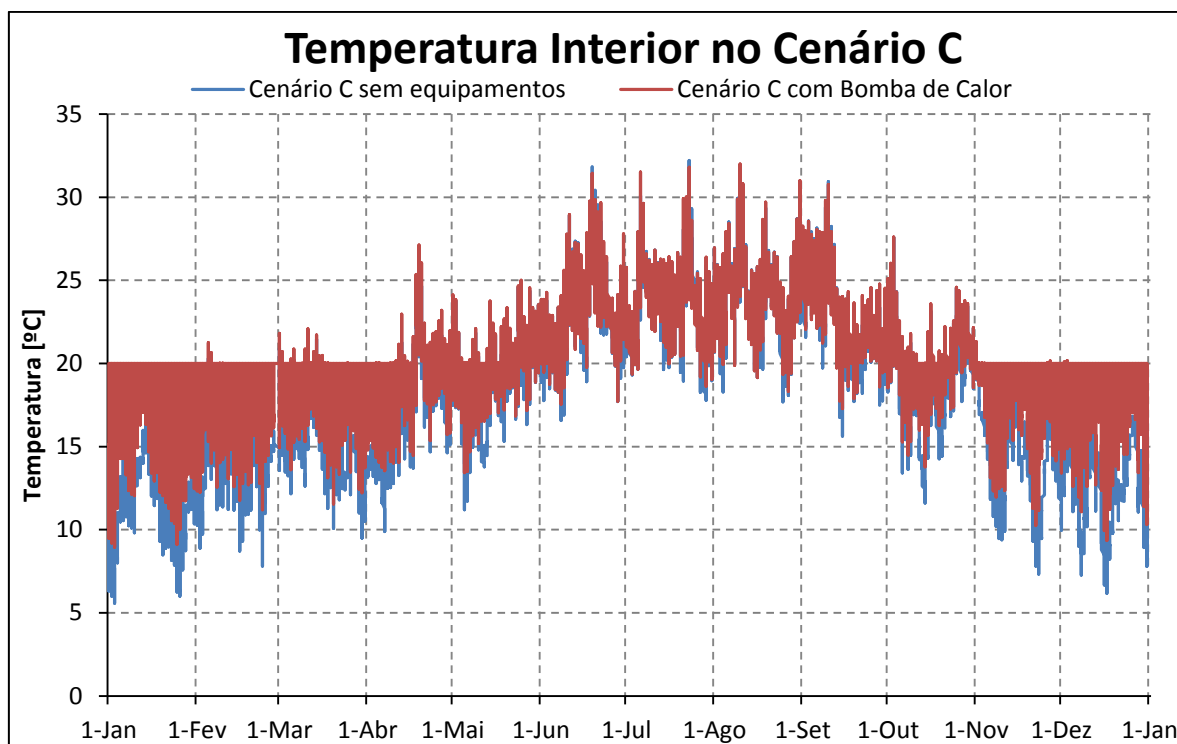


Figura 50 - Temperatura interior no Porto no Cenário C com Equipamento Bomba de Calor

Na Figura 50 podemos observar a temperatura interior da habitação, para o Cenário C, sem equipamentos, a azul, e com recurso a Bomba de Calor, a vermelho.

Como neste cenário o funcionamento do sistema de climatização é intermitente, ou seja, este apenas funciona entre as 18:00 e as 00:00 diariamente, ao contrário dos cenários anteriores, em que este funcionava continuamente, os resultados obtidos não são tão satisfatórios como os anteriores.

Neste cenário foi definido o funcionamento para esse intervalo de tempo de modo a simular a situação de quando as pessoas chegam a casa após o trabalho por volta das 18:00 e ligam o equipamento até às 00:00, hora em que vão dormir. Desta forma o equipamento aquece/arrefece a habitação apenas durante este período, estando desligado durante o resto do dia.

Analisando a Figura 50 podemos ver que nem sempre a temperatura se encontra dentro dos limites definidos no *setpoint* em que as temperaturas variam entre 20°C e 25°C, devido ao funcionamento intermitente do sistema de climatização. No Verão esta situação é aceitável uma vez que como as temperaturas interiores sem equipamentos não são muito elevadas, é suficiente para garantir um período de conforto enquanto as pessoas estão na habitação, que se supõe que seja entre as 18:00 e as 08:00 horas do dia seguinte. Contudo, no Inverno esta situação já não é muito aceitável pois existem momentos em que as temperaturas atingem os 10°C, mas a maioria situa-se entre os 15°C e os 20°C pelo que se admite que quando as temperaturas atingem os valores mínimos seja na situação em que não existe ninguém no interior da habitação já que nesse período o equipamento está desligado, e as pessoas quando chegam a casa ligam o equipamento, este funciona até às 00:00 e a partir daí a temperatura vai descendo gradualmente, logo quando atinge os valores mínimos será certamente depois das 08:00, quando já não se encontra ninguém no interior na habitação.

Antes de apresentar as tabelas com os resultados obtidos nas simulações, vai-se primeiro clarificar os conceitos de todos os resultados que são apresentados:

Air Temperature (°C) – Temperatura do ar da zona

Radiant Temperature (°C) – Média da temperatura radiante da zona (MRT), assumindo que a pessoa está no centro da zona sem ponderação para qualquer superfície em particular

Operative Temperature (°C) – Média da temperatura do ar e da temperatura radiante

Outside Dry-Bulb Temperature (°C) – Temperatura exterior sem o efeito da humidade e radiação

Glazing (kWh) – fluxo total de calor para a zona a partir do envidraçado, caixilharia e divisor do vidro exterior, excluindo a radiação solar de onda curta (é tida em conta em Solar Gains Exterior Windows)

Walls (kWh) – ganho de calor devido à condução através de todas as paredes externas incluindo o efeito da radiação solar

Ground Floor (kWh) – ganhos de calor por condução através do pavimento

Roofs (kWh) – ganhos de calor por condução através de todas as coberturas externas, incluindo o efeito da radiação solar

External Infiltration (kWh) – ganhos de calor através da infiltração de ar (entrada de ar não convencional)

Miscellaneous (kWh) – ganhos de calor através de equipamentos diversos

Solar Gains Exterior Windows (kWh) – ganhos de calor devido à radiação solar que passa através do envidraçado

Zone Sensible Heating (kWh) – aquecimento introduzido na zona através do sistema de climatização

Zone Sensible Cooling (kWh) – arrefecimento introduzido na zona através do sistema de climatização

Sensible Cooling (kWh) – é a taxa a que a energia sensível é removida da mistura do ar exterior e do fluxo de ar de retorno de modo a baixar a temperatura para a temperatura especificada do fluxo de ar de alimentação

Total Cooling (kWh) – é a taxa a que a energia total (sensível e latente) é removida do exterior e do fluxo de ar de retorno de modo a trazer o fluxo de ar misturado com a temperatura e humidade específica do fluxo de ar de alimentação

Zone Heating (kWh) – energia fornecida pelos aquecedores e bobinas de reaquecimento para manter a temperatura nominal interna

Mec. Vent. + Nat. Vent. + Infiltration (ac/h) – a soma do ar exterior a entrar na zona devido a :

- Sistema AVAC
- Infiltração
- Ventilação Natural

De seguida é apresentada a Tabela 11, que contém os resultados obtidos na simulação para o período de aquecimento, que está compreendido entre os meses de Outubro a Março (inclusive). Os valores apresentados na tabela são valores médios para cada mês.

Esta tabela e as seguintes apenas irão ser apresentadas para o Cenário A como forma de exemplo, de modo a explicar os resultados obtidos no programa e como podem estes ser interpretados.

Tabela 11 – Tabela referente ao período de Aquecimento

		Outubro	Novembro	Dezembro	Janeiro	Fevereiro	Março
Temperatura do Ar	°C	23,08	21,35	21,14	21,17	21,67	22,16
Temperatura Radiante	°C	24,73	21,56	21,14	21,16	22,45	23,46
Temperatura Operativa	°C	23,90	21,46	21,14	21,17	22,06	22,81
Temp. de Bolbo Seco	°C	15,53	12,15	10,32	9,36	10,66	11,62
Glazing	kWh	-184,47	-196,73	-227,31	-249,97	-225,45	-236,76
Walls	kWh	-184,80	-205,99	-247,14	-269,35	-236,49	-235,38
Ground Floor	kWh	-20,51	-6,12	-24,59	-15,67	-14,40	-29,22
Roofs	kWh	-95,41	-119,74	-142,53	-156,50	-121,65	-112,34
External Infiltration	kWh	-198,49	-238,36	-292,43	-321,42	-266,53	-281,66
Miscellaneous	kWh	105,98	96,77	101,38	105,98	92,16	96,77
Solar Gains Exterior Windows	kWh	894,14	577,28	655,29	684,23	770,45	929,81
Zone Sensible Heating	kWh	43,96	180,34	277,64	302,96	154,73	110,80
Zone Sensible Cooling	kWh	-355,28	-84,83	-96,72	-76,27	-148,67	-237,57
Sensible Cooling	kWh	-355,27	-84,82	-96,72	-76,27	-148,67	-237,57
Total Cooling	kWh	-394,85	-92,90	-104,90	-82,78	-161,26	-259,39
Zone Heating	kWh	43,96	180,34	277,64	302,96	154,73	110,80
Mec. Vent. + Nat. Vent. + Infiltration	ac/h	0,82	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83

Analisando a Tabela 11 podemos facilmente perceber que os ganhos de calor através dos envidraçados, devido aos raios solares, não são suficientes para manter a habitação a uma temperatura confortável, pelo que é necessário recorrer à utilização do sistema de climatização para compensar as perdas através da caixilharia das janelas, paredes, pavimento, cobertura e infiltração externa de ar.

Os ganhos de calor dão-se através dos raios solares incidentes sob os envidraçados e devido à taxa de 4 W/m² de ganhos térmicos de fontes internas definida de acordo com o Quadro IV.3 do RCCTE. A utilização do equipamento para aquecimento é maior no mês de Janeiro, já que é neste período que o défice de ganhos de calor é mais acentuado, uma vez que as perdas são máximas neste mês, e os ganhos solares são dos mais baixos, logo é necessário maior tempo de funcionamento do sistema de climatização por fim a aquecer o ambiente interior.

Analisando a energia total de arrefecimento (*Total Cooling*) e a energia de arrefecimento sensível (*Zone Sensible Cooling*), constata-se que existe uma fração de energia de arrefecimento que corresponde à energia de arrefecimento latente. A componente sensível apenas provoca a alteração de temperatura, enquanto que a componente latente não altera a temperatura mas é responsável por mudanças de estado, como acontece no caso da situação de arrefecimento, em que é retirado calor latente do ar, o que provoca a secagem do ar interior, uma vez que se está a retirar humidade do ar.

Tabela 12 – Tabela referente ao período de Arrefecimento

		Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro
Temperatura do Ar	°C	22,55	22,67	23,77	24,01	24,21	23,98
Temperatura Radiante	°C	23,93	23,81	25,39	25,64	26,33	26,13
Temperatura Operativa	°C	23,24	23,24	24,58	24,83	25,27	25,05
Temperatura de Bolbo Seco	°C	13,16	14,55	17,82	18,99	19,38	18,01
Glazing	kWh	-205,78	-190,17	-143,24	-129,52	-126,93	-142,26
Walls	kWh	-187,54	-154,49	-66,29	-76,45	-77,72	-113,91
Ground Floor	kWh	-21,03	-20,00	-22,95	-22,59	-26,10	-21,96
Roofs	kWh	-82,07	-52,89	6,67	-10,31	-24,98	-43,65
External Infiltration	kWh	-241,39	-214,98	-151,19	-131,11	-126,32	-150,49
Miscellaneous	kWh	101,38	105,98	92,16	105,98	101,38	96,77
Solar Gains Exterior Windows	kWh	793,90	635,27	543,16	575,15	747,24	832,59
Zone Sensible Heating	kWh	73,92	41,96	1,95	0,70	0,40	2,28
Zone Sensible Cooling	kWh	-227,36	-148,08	-257,53	-308,69	-462,68	-454,80
Sensible Cooling	kWh	-227,36	-148,08	-257,53	-308,69	-462,68	-454,80
Total Cooling	kWh	-251,15	-167,23	-294,84	-359,30	-529,72	-519,61
Zone Heating	kWh	73,92	41,96	1,95	0,70	0,40	2,28
Mec. Vent. + Nat. Vent. + Infiltration	ac/h	0,83	0,82	0,82	0,81	0,81	0,82

Na Tabela 12 estão representados os resultados obtidos para o período de arrefecimento, correspondente à época de Verão.

O mês em que o sistema de climatização é mais solicitado é no mês de Agosto, uma vez que as perdas são das mais baixas embora os ganhos solares através dos envidraçados não sejam os mais elevados, havendo necessidade de recorrer ao sistema de climatização, uma vez que as perdas de calor não são suficientes para reduzir a temperatura do interior da habitação para limites de conforto aceitáveis.

Tabela 13 – Consumo energético anual final [kWh]

	Canário A	Cenário B	Cenário C
Aquecimento (Eletricidade)	297,91	722,91	264,70
Arrefecimento (Eletricidade)	1072,64	78,51	35,47

Relativamente aos consumos energéticos anuais finais propriamente ditos, representados da Tabela 13, para o Cenário A os gastos de energia são muito mais elevados no arrefecimento do que no aquecimento, uma vez que no clima do Porto as temperaturas durante o Inverno não são muito baixas, logo é requerido pouco recurso ao sistema de climatização para aquecer o ambiente e aumentar a temperatura interior. O mesmo já não sucede no período de arrefecimento, no Verão, já que na região do Porto, como podemos observar na Figura 47, no interior da habitação sem utilização de equipamentos de climatização, as temperaturas ultrapassam os 40°C, uma temperatura que já é muito desconfortável. Essa situação traduz-se num consumo que é aproximadamente 3,6 vezes superior aos consumos registados para aquecimento. Relativamente aos Cenários B e C, o consumo já é mais elevado no período de aquecimento, muito devido ao sombreamento, que reduz significativamente os ganhos solares, o que faz com que a temperatura desça consideravelmente, durante todo o ano, no interior da habitação sem recurso a qualquer tipo de equipamento.

Tabela 14 – Necessidades energéticas mensais

	Zona de arrefecimento [kWh]	Máximo no período de arrefecimento [W]	Data em que se verifica o valor máximo	Zona de aquecimento [kWh]	Máximo no período de aquecimento [W]	Data em que se verifica o valor máximo
Janeiro	82,78	1982,68	26 14:45	302,96	1592,34	25 07:45
Fevereiro	161,26	3418,76	06 15:30	154,73	1313,95	02 07:45
Março	259,39	3348,91	01 14:00	110,80	1110,27	30 04:00
Abril	251,15	3120,91	19 14:30	73,92	1188,02	07 04:00
Maiο	167,23	2088,43	01 14:15	41,96	1152,99	05 05:00
Junho	294,84	2570,51	19 13:00	1,95	364,66	08 04:00
Julho	359,30	3013,17	23 14:30	0,70	162,94	29 05:30
Agosto	529,73	3418,76	30 15:15	0,40	169,46	25 06:30
Setembro	519,61	3418,76	06 13:30	2,27	308,50	15 06:15
Outubro	394,85	3418,76	01 15:00	43,96	1039,99	14 05:00
Novembro	92,90	2298,92	06 14:30	180,34	1318,38	22 07:30
Dezembro	104,90	3167,25	02 14:30	277,64	1500,66	16 07:45
Soma anual	3217,93			1191,63		

Na tabela anterior estão representados detalhadamente as necessidades energéticas devido ao sistema de climatização por mês, de modo a perceber melhor em que meses se verifica uma maior necessidade de energia, que corresponde a uma maior necessidade de reduzir ou aumentar a temperatura interior da habitação. Também é possível saber em que altura do mês, isto é, o dia e a hora em que se dá essa necessidade de energia. Assim é possível saber em que períodos é necessário uma maior utilização do sistema de climatização.

Tabela 15 – Descriminação dos ganhos/perdas de calor para os picos de aquecimento/arrefecimento

	Pico de Arrefecimento	Pico de Aquecimento
Data	1 Outubro 13:30	25 Janeiro 07:45
Entrada de ar aquecido sensível HVAC [W]	0	1592,27
Entrada de ar arrefecido sensível HVAC [W]	-3277,78	0
Adição de calor sensível por pessoas [W]	0	0
Adição de calor sensível por iluminação [W]	0	0
Adição de calor sensível por equipamentos [W]	192,00	192,00
Adição de calor por janelas [W]	6044,44	0
Adição de calor por infiltração [W]	0	0
Adição de calor por condução em superfícies opacas [W]	0	0
Remoção de calor sensível por equipamentos [W]	0	0
Remoção de calor por janelas [W]	0	-511,32
Remoção de calor por infiltração [W]	-67,45	-755,13
Remoção de calor por condução em superfícies opacas [W]	-2941,21	-517,82

Na Tabela 15 encontra-se detalhadamente todos os ganhos e perdas de calor correspondentes ao pico de arrefecimento e de aquecimento. Desta forma podemos compreender por onde se está a perder calor (para a situação de aquecimento) e porventura efetuar alterações construtivas nesses elementos, por forma a minimizar as perdas e do mesmo modo, reduzir as necessidades energéticas do sistema de climatização.

Para a situação de arrefecimento podemos ver onde estão os principais ganhos de calor e desta forma atuar para reduzir os mesmos. Nesta situação, os ganhos de calor encontram-se na adição de calor através das janelas, pelo que para reduzir esta adição é neste elemento que deveríamos atuar e implementar soluções, que poderiam ir desde a aplicação de palas para sombreamento, ou até mesmo à inclusão de dispositivos de oclusão, de modo a reduzir o fluxo de calor a entrar na habitação por este elemento.

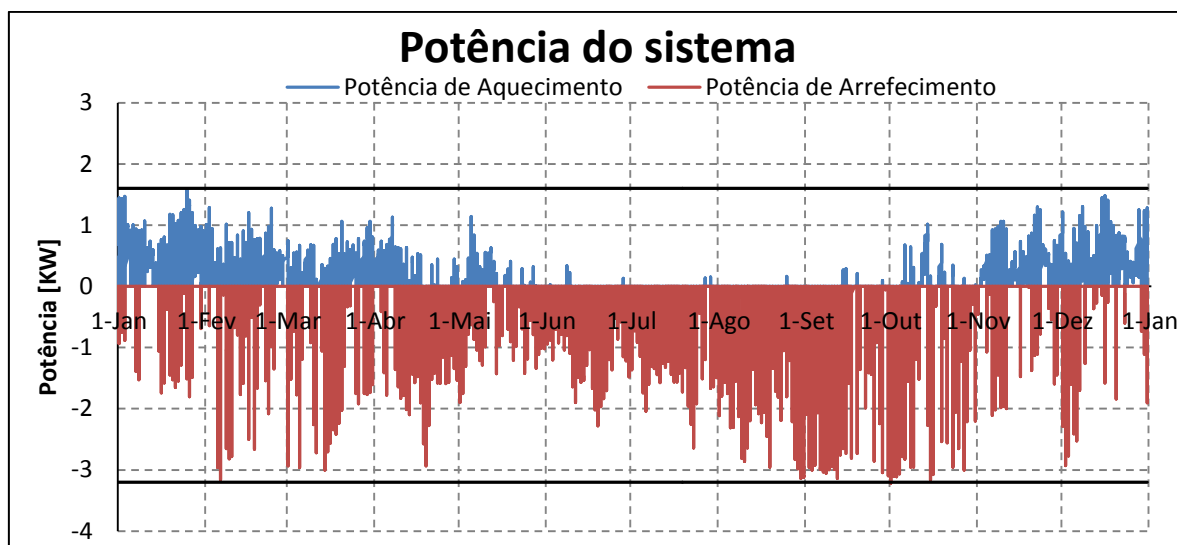


Figura 51 – Potência utilizada pelo sistema de climatização no Cenário A

Na Figura 51 está representada a potência solicitada ao longo do ano pelo sistema de arrefecimento e pelo sistema de aquecimento. Deste modo é possível ver qual a potência máxima requerida para cada situação ao longo do ano de modo a escolher a potência mais adequada para o sistema de climatização. O valor máximo para a situação de aquecimento é uma potência de 1,58 KW, e para a situação de arrefecimento, o máximo é de 3,22 KW.

Analisando os valores apresentados no gráfico, a potência a adotar para o sistema de aquecimento deve ser de 1,6 KW, e para o sistema de arrefecimento 3,2 KW, uma vez que estes limites correspondem ao valor máximo atingido para cada situação.

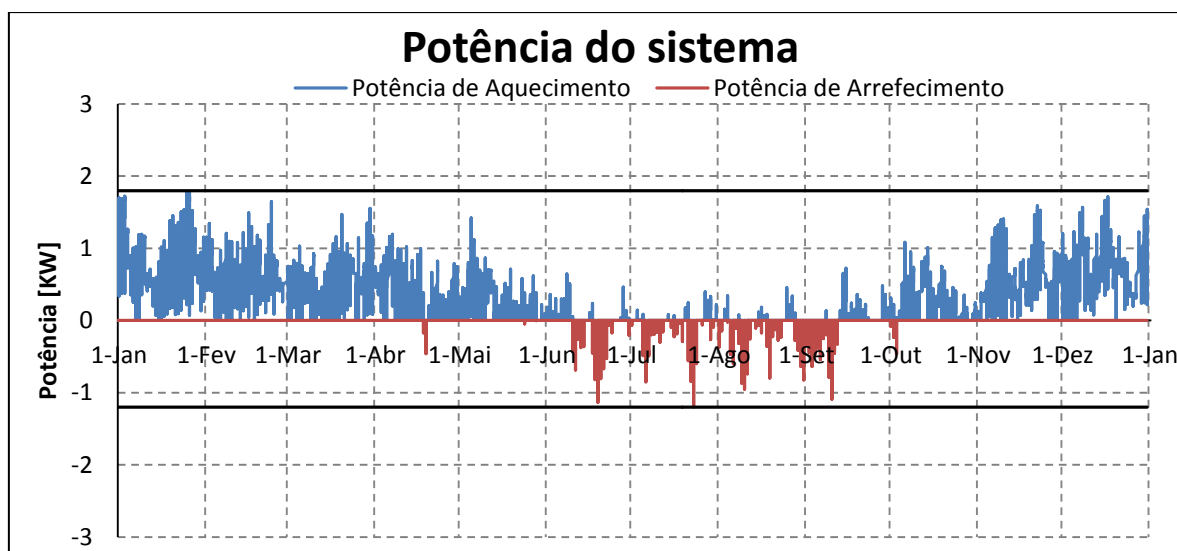


Figura 52 - Potência utilizada pelo sistema de climatização no Cenário B

Na Figura 52 está representada a potência solicitada ao longo do ano para o Cenário B pelo sistema de aquecimento e pelo sistema de arrefecimento. O valor máximo atingido pelo sistema de aquecimento foi de 1,77 KW, e pelo sistema de arrefecimento foi de 1,20 KW. Analisando o gráfico, como estes

valores representam a máxima solicitação do equipamento, para ambas as situações, os valores a adotar para o sistema de aquecimento deve ser de 1,8 KW, e para o sistema de arrefecimento 1,2 KW.

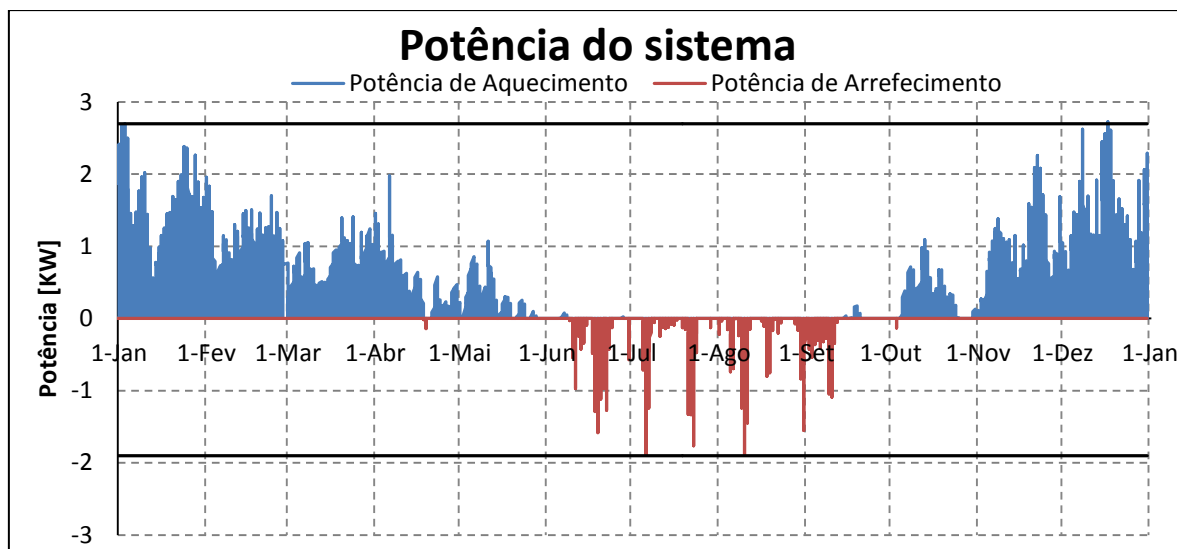


Figura 53 - Potência utilizada pelo sistema de climatização no Cenário C

Na Figura 53 está representada a potência solicitada pelo sistema de climatização para o Cenário C. Os valores máximos registados, para o período de aquecimento, foram de 2,72 KW, e para o período de arrefecimento foram de 1,90 KW. O valor a adotar para o sistema de aquecimento deve ser na ordem dos 2,9 KW, e para o sistema de arrefecimento, na ordem dos 1,9 KW.

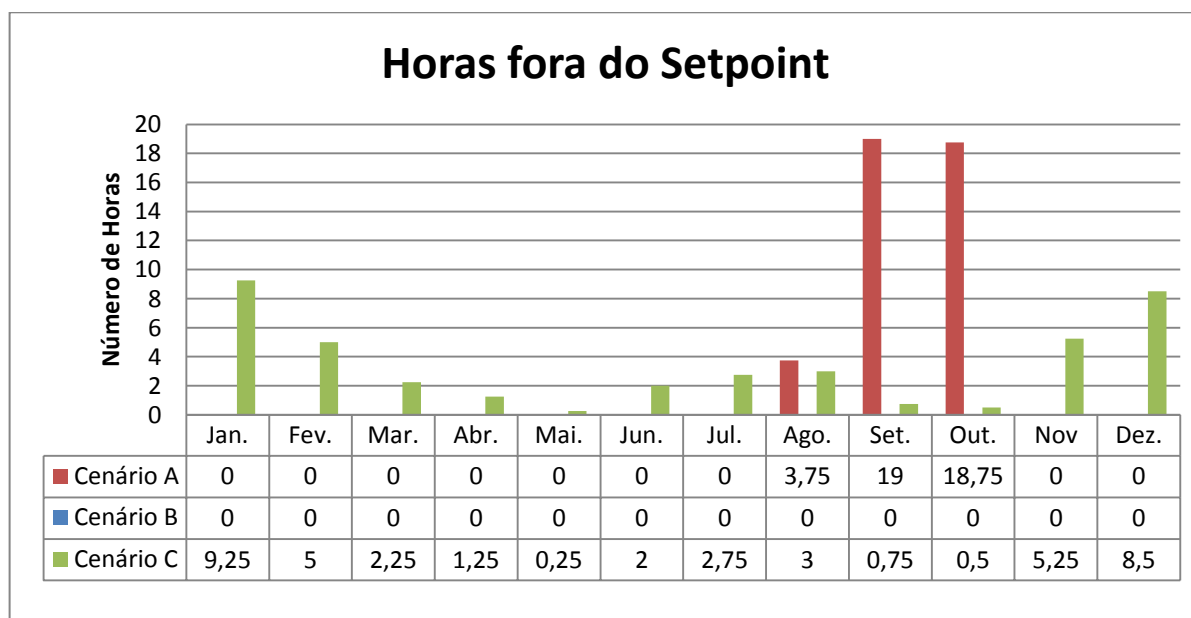


Figura 54 – Número de horas que a temperatura está fora do Setpoint

Outro aspeto importante da análise do comportamento do sistema de climatização é se existe algum período do ano, em que o equipamento esteja a funcionar mas que não esteja a ter um desempenho favorável, ou seja, a temperatura interior não esteja dentro dos limites de conforto. Para este caso em

concreto, verificou-se que ao longo do ano não existe nenhum período em que a temperatura interior não esteja dentro dos limites de *setpoint*.

Os limites de conforto são determinados com base na humidade e temperatura do ar, variando também com o tipo de roupa vestido.

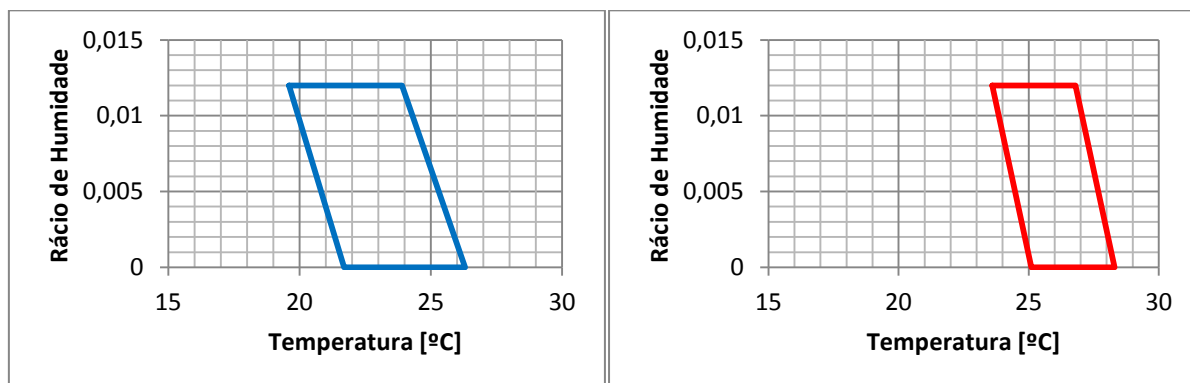


Figura 55 – Limites de Conforto de temperatura para Inverno (azul) e Verão (vermelho)

4.3.3. CENÁRIO COM AQUECIMENTO POR CALDEIRA + RADIADOR

Após efetuar a análise do sistema Bomba de Calor (Chiller + Split), vai-se realizar também a análise detalhada do outro equipamento, também para a zona do Porto. Deste modo é possível comparar os resultados dos 2 equipamentos para o período de aquecimento, uma vez que o sistema Caldeira + Radiador apenas funciona em prol de aquecer o ambiente anterior.

Na Tabela 16 apresentam-se as definições relativas às características do sistema caldeira + radiador, de modo a configurar o programa para efetuar a simulação para este respetivo sistema.

Tabela 16 – Características do sistema Caldeira + Radiador

Parâmetros Caldeira + Radiador	
Aquecimento	
Capacidade	Auto dimensionamento
Combustível	Gás Natural
CoP	0,90
Tipo	Radiativo/Convectivo
Fração Radiante	0,40
Distribuição	Uniforme
Operação	
Pré-aquecimento	0 h
Controlo Sazonal	Anual

Dias/Semana	7
Arrefecimento	Desligado
Águas Quentes Sanitárias	Desligado
Ventilação Natural	Desligado

Após a introdução das características do sistema no programa, efetuou-se a simulação para o Cenário A, e obtiveram-se os resultados apresentados na Figura 56, em termos de temperatura interior.

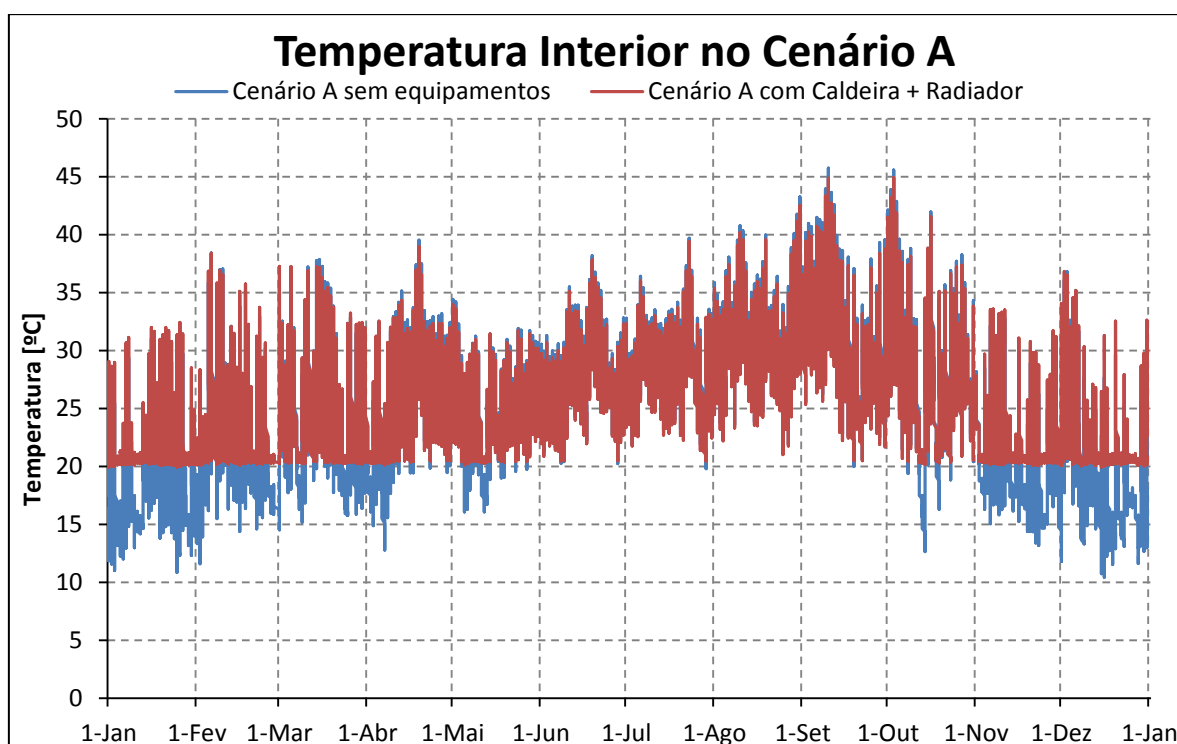


Figura 56 – Temperatura interior com e sem utilização do equipamento caldeira + radiador para Cenário A

Analisando a figura anterior, em que estão representados os gráficos relativos à temperatura no interior da habitação sem recurso a equipamentos a azul e da mesma mas com utilização do sistema de aquecimento a vermelho, conclui-se que o equipamento é eficaz no aquecimento do ambiente interior, no período de Inverno, uma vez que as temperaturas mínimas registadas situam-se na fasquia dos 20°C, e sem recurso a este equipamento estas podiam atingir mínimas na ordem de cerca de 10°C. Nesta situação apenas se analisa o sistema para o período de aquecimento, que corresponde aos meses compreendidos entre Outubro e Março (inclusive), já que este equipamento apenas permite aquecer o ambiente, não tem função de arrefecimento.

De seguida apresenta-se a Figura 57, respetiva às temperaturas interiores da habitação, sem qualquer tipo de equipamento, e com recurso à Caldeira + Radiador, para o Cenário B. O sistema proporciona resultados satisfatórios uma vez que as temperaturas, ao longo do período de aquecimento, apresentam-se sempre acima do limite de 20°C, logo estas estão dentro dos limites de conforto uma vez que no mesmo período essas mesmas temperaturas nunca chegam a ultrapassar os 25°C.

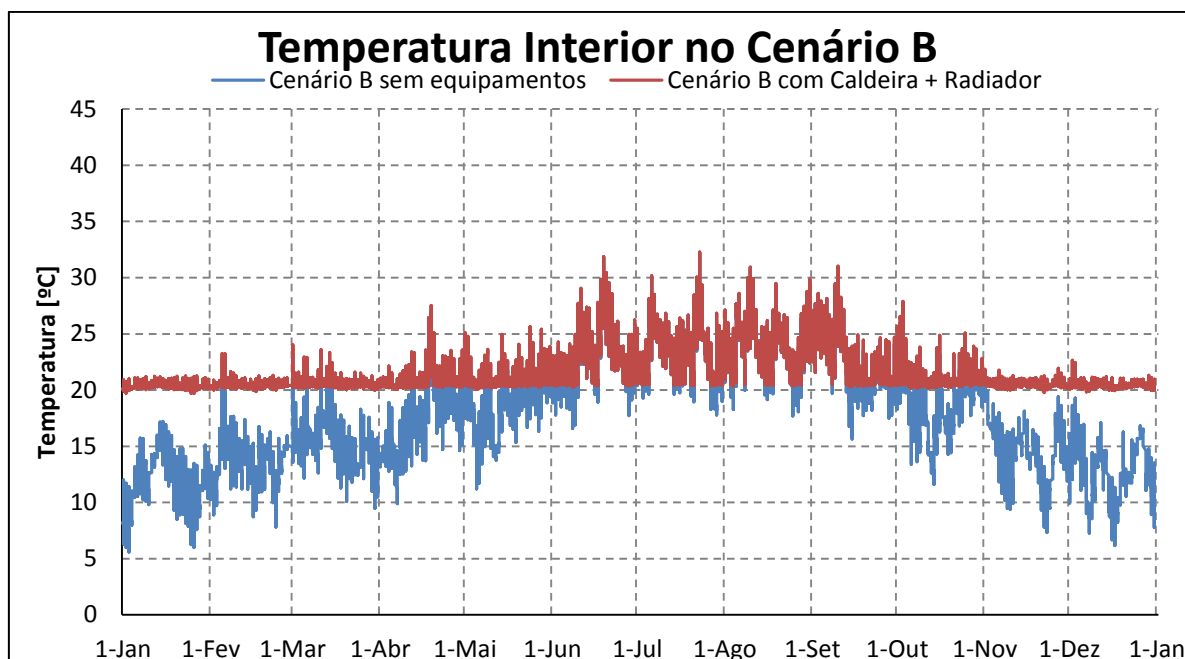


Figura 57 - Temperatura interior com e sem utilização do equipamento caldeira + radiador para Cenário B

Na Figura 58 apresentam-se as temperaturas interiores sem e com recurso ao equipamento Caldeira + Radiador, para o Cenário C, em que o funcionamento do equipamento é intermitente, uma vez que este apenas está ligado entre as 18:00 e as 00:00 diariamente. No Verão esta situação é aceitável uma vez que como as temperaturas interiores sem equipamentos não são muito elevadas, contudo, no Inverno esta situação já não é muito aceitável pois existem momentos em que as temperaturas atingem os 10°C.

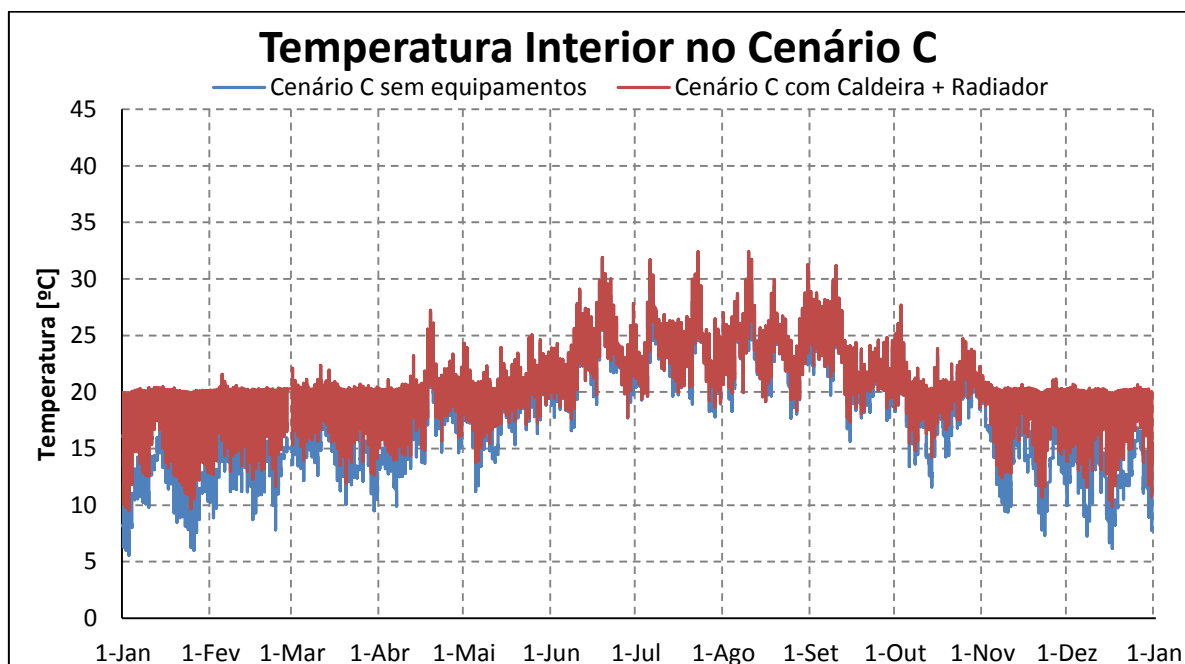


Figura 58 - Temperatura interior com e sem utilização do equipamento caldeira + radiador para Cenário C

De seguida é apresentada a tabela com os resultados obtidos para esta simulação relativa ao Cenário A apenas, contudo apenas são apresentados os dados relativos ao período de aquecimento, uma vez que este equipamento não apresenta a funcionalidade de arrefecimento, não faz sentido apresentar os resultados para esse período em questão, uma vez que as temperaturas são iguais à situação em que não há equipamentos.

Tabela 17 – Tabela referente ao período de aquecimento

		Outubro	Novembro	Dezembro	Janeiro	Fevereiro	Março
Temperatura do Ar	°C	27,69	22,68	22,52	22,31	23,71	24,96
Temperatura Radiante	°C	28,68	22,99	22,74	22,58	24,43	25,98
Temperatura Operativa	°C	28,18	22,84	22,63	22,44	24,07	25,47
Temp. de Bolbo Seco	°C	15,53	12,15	10,32	9,36	10,66	11,62
Glazing	kWh	-283,14	-227,79	-261,66	-279,84	-268,22	-298,03
Walls	kWh	-284,92	-240,86	-287,35	-304,92	-282,17	-299,75
Ground Floor	kWh	-21,31	-5,68	-28,85	-16,93	-17,53	-35,64
Roofs	kWh	-141,44	-135,85	-161,19	-172,91	-142,72	-142,11
External Infiltration	kWh	-318,74	-272,63	-329,40	-352,18	-315,47	-355,96
Miscellaneous	kWh	105,98	96,77	101,38	105,98	92,16	96,77
Solar Gains Exterior Windows	kWh	894,14	577,28	655,29	684,23	770,45	929,81
Zone Sensible Heating	kWh	43,59	203,76	307,21	334,51	157,54	100,91
Zone Heating	kWh	43,59	203,76	307,21	334,51	157,54	100,91
Mec. Vent. + Nat. Vent. + Infiltration	ac/h	0,83	0,83	0,83	0,84	0,84	0,84

Analisando a tabela anterior podemos concluir que este equipamento é eficaz, já que a temperatura média interior em cada mês se situa acima dos 20°C, sendo o valor mínimo registado de 22,31°C correspondente ao mês de Janeiro. O mês em que se regista uma maior utilização do equipamento é Janeiro, que embora não seja o mês em que os ganhos térmicos por efeito da radiação solar sejam menores, é nesta altura que ocorrem grandes perdas térmicas, que juntamente com os baixos ganhos devido à radiação solar e a equipamentos diversos (*Miscellaneous*), tornam Janeiro o mês em que o equipamento é mais requisitado para aquecer o ambiente interior.

Tabela 18 – Consumo energético anual final para aquecimento

	Cenário A	Cenário B	Cenário C
Aquecimento (Gás Natural)	1402,39	3801,33	1484,84

O consumo energético total anual, para aquecimento, é muito mais elevado para o Cenário B, uma vez que o equipamento está sempre ligado, e devido à proteção solar a temperatura interior é muito mais baixa do que na situação do Cenário A, em que não existe qualquer tipo de proteção solar. No Cenário C o consumo é inferior ao Cenário B uma vez que o equipamento está em funcionamento intermitente.

Na Tabela 19 encontra-se representada as necessidades energéticas do sistema de aquecimento a nível mensal para o Cenário A apenas, para uma melhor compreensão das necessidades e quais os meses em que esta é mais elevada.

Tabela 19 – Necessidades energéticas mensais

	Zona de aquecimento [kWh]	Máximo no período aquecimento [W]
Janeiro	334,51	2282,57
Fevereiro	157,54	1682,08
Março	100,91	1661,68
Abril	67,88	1574,57
Maio	44,62	1511,04
Junho	1,00	547,51
Julho	0,55	588,12
Agosto	0,00	0,00
Setembro	0,58	362,27
Outubro	43,59	1764,80
Novembro	203,76	1764,80
Dezembro	307,21	1927,58
Soma anual	1262,15	

Analisando a tabela anterior, constata-se que o sistema ainda é solicitado no período de arrefecimento, uma vez que em Abril e Maio, meses que pertencem ao período de arrefecimento, ainda existem consumos consideráveis, e analisando a Figura 56, podemos observar que existem alturas em que as temperaturas no interior, se o equipamento não estivesse em funcionamento, atingiam os 10°C.

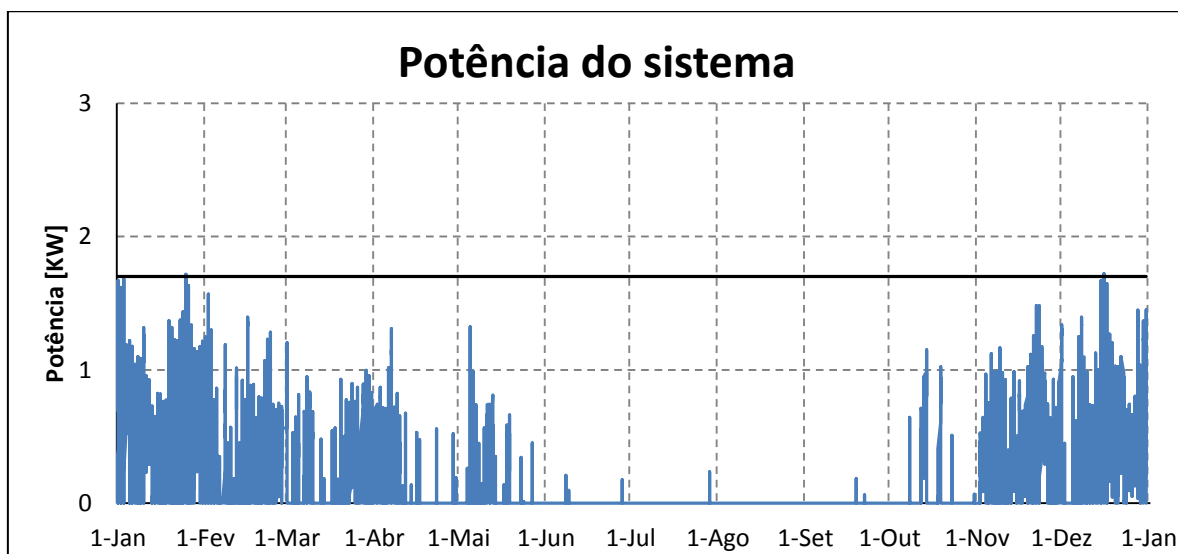


Figura 59 – Potência do equipamento Caldeira + Radiador para o Cenário A

Na Figura 59 está representada a potência solicitada ao longo do ano pelo sistema de aquecimento para o Cenário A. Analisando o gráfico da figura, e sabendo que o valor máximo registado foi de 1,72 KW, penso que seria coerente admitir uma potência de 1,7 KW para este equipamento, uma vez que este valor permite ao equipamento responder com eficácia durante todo o ano.

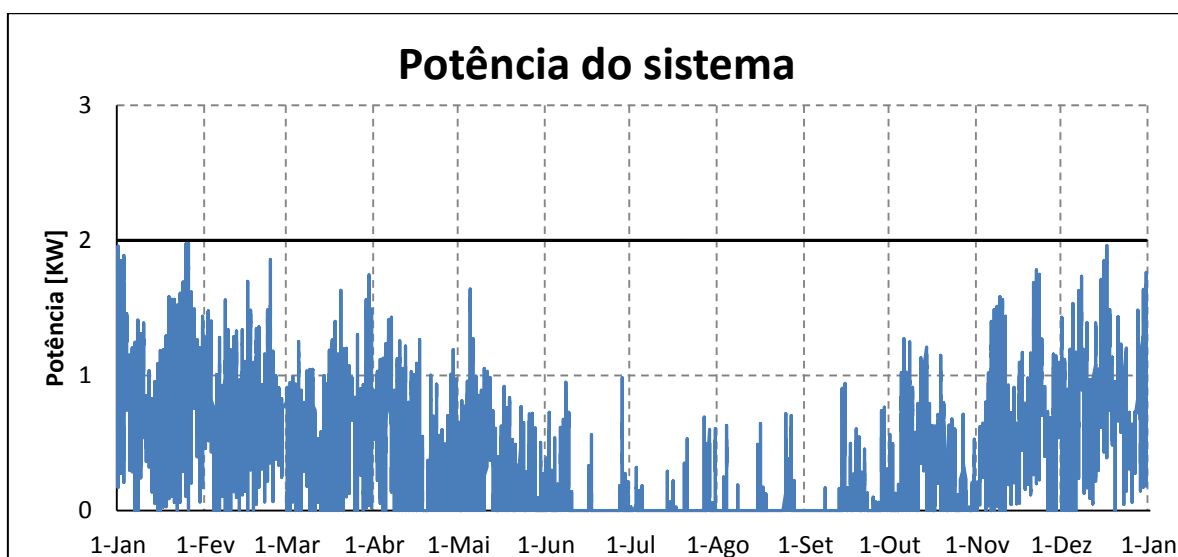


Figura 60 – Potência do equipamento Caldeira + Radiador para o Cenário B

Na figura anterior está representada a solicitação de potência por parte do equipamento Caldeira + Radiador ao longo do ano. O registo máximo registado nesse período foi de 2,00 KW, pelo que o valor mais correto a adotar para a potência desse equipamento no Cenário B será de 2,0 KW.

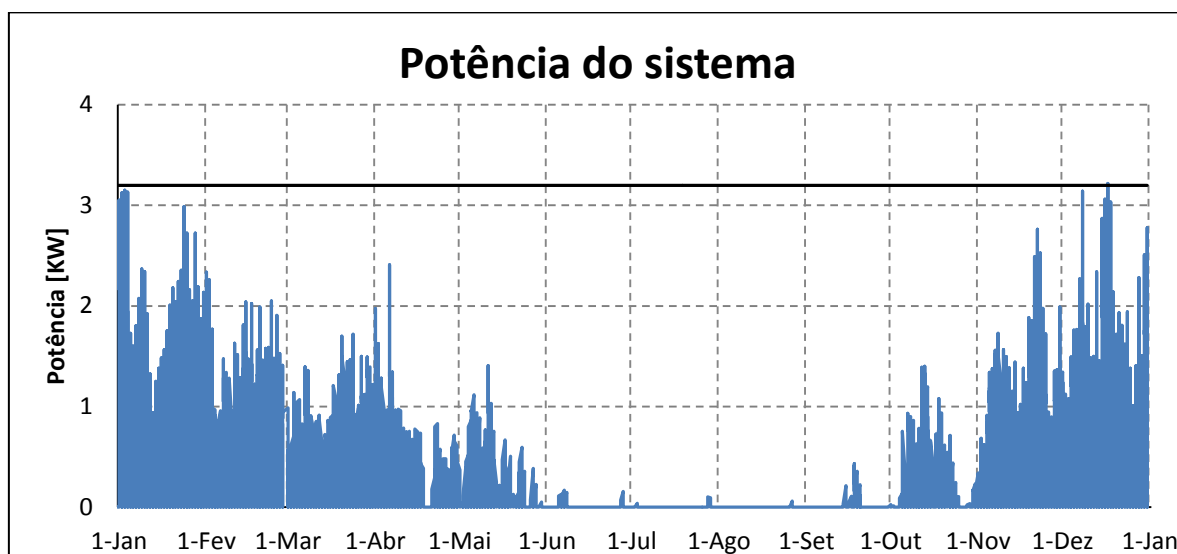


Figura 61 – Potência do equipamento Caldeira + Radiador para o Cenário C

Na Figura 61 está representada a potência solicitada ao longo do ano pelo equipamento Caldeira + Radiador, para a situação do Cenário C, em que o funcionamento do equipamento é intermitente, logo este necessita de uma potência maior que nos cenários anteriores para aquecer o mesmo ambiente num espaço mais curto de tempo. O valor máximo registado para o período de um ano foi de 3,22 KW, pelo que o valor mais correto a adotar para a potência deste equipamento no Cenário C será de 3,2 KW.

Relativamente às horas de desconforto, e horas em que a temperatura interior não está dentro do limite do *setpoint*, o programa não calcula uma vez que não existe um equipamento a funcionar em modo de arrefecimento, pelo que as temperaturas passam muitas vezes o limite dos 25°C utilizado para o sistema de ar condicionado, assim como os limites de conforto definidos na Figura 55.

4.3.4. COMPARAÇÃO DOS CENÁRIOS PARA O PORTO

Após se ter efetuado a descrição detalhada das simulações dos equipamentos em análise para a cidade do Porto, vou agora proceder à comparação entre eles para a situação de aquecimento, de modo a obter uma análise mais detalhada sobre as vantagens e desvantagens de cada um.

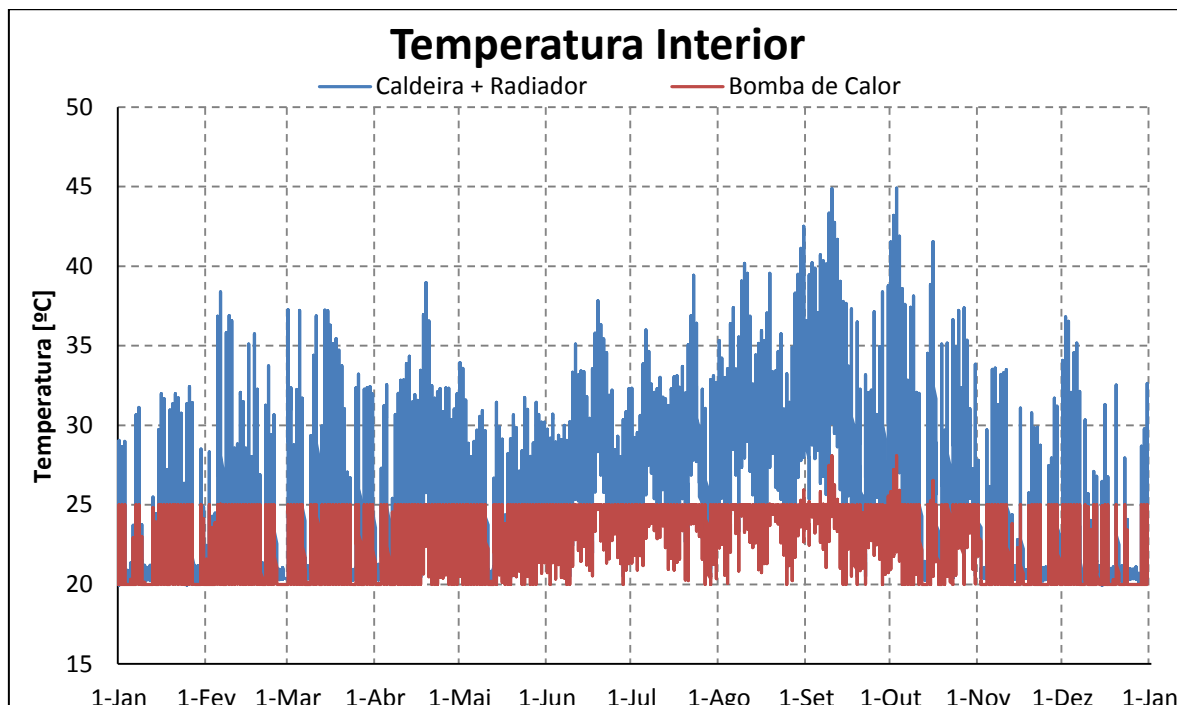


Figura 62 – Comparação da Temperatura interior com os 2 equipamentos para o Cenário A

Analisando a Figura 62, pode-se concluir que em termos de aquecimento, tanto o equipamento Bomba de Calor como o Caldeira + Radiador apresentam resultados muito satisfatórios, uma vez que estes nunca chegam a atingir temperaturas abaixo dos 20°C, conforme definido no *setpoint*. Em termos de arrefecimento não faz sentido uma análise dos 2 equipamentos visto que apenas um deles tem essa função. No entanto, não é suficiente comparar apenas a temperatura interior da habitação para cada equipamento, pois, para além da questão do conforto, que está relacionada com a temperatura, existe também a questão económica, por forma a ver qual equipamento possui as melhores características de conforto, aliadas a um consumo energético sustentável.

Nas figuras seguintes (Figura 63 e Figura 64), encontra-se representada a temperatura interior da habitação com utilização de Bomba de Calor, a vermelho, e com utilização do sistema Caldeira + Radiador, a azul, para o Cenário B e para o Cenário C, respetivamente. No caso do Cenário B, para o período de aquecimento, ambos os sistemas têm um comportamento muito satisfatório, pois as temperaturas situam-se praticamente sempre acima do valor mínimo definido no *setpoint* que era de 20°C, pelo que existe sempre uma temperatura interior confortável no interior da habitação.

Relativamente ao Cenário C, devido ao funcionamento intermitente de ambos os sistemas, a temperatura interior para as duas situações possui uma amplitude muito maior do que nos casos anteriores. Contudo, admite-se que, como os equipamentos estão ligados das 18:00 às 00:00, a temperatura vai descendo gradualmente ao longo do dia, atingindo os valores mínimos num período em que alegadamente não existe ninguém no interior da habitação, admitindo que a habitação é frequentada entre as 18:00 e as 08:00 do dia seguinte, pelo que até as 08:00 a temperatura interior ainda esteja acima dos valores mínimos registados.

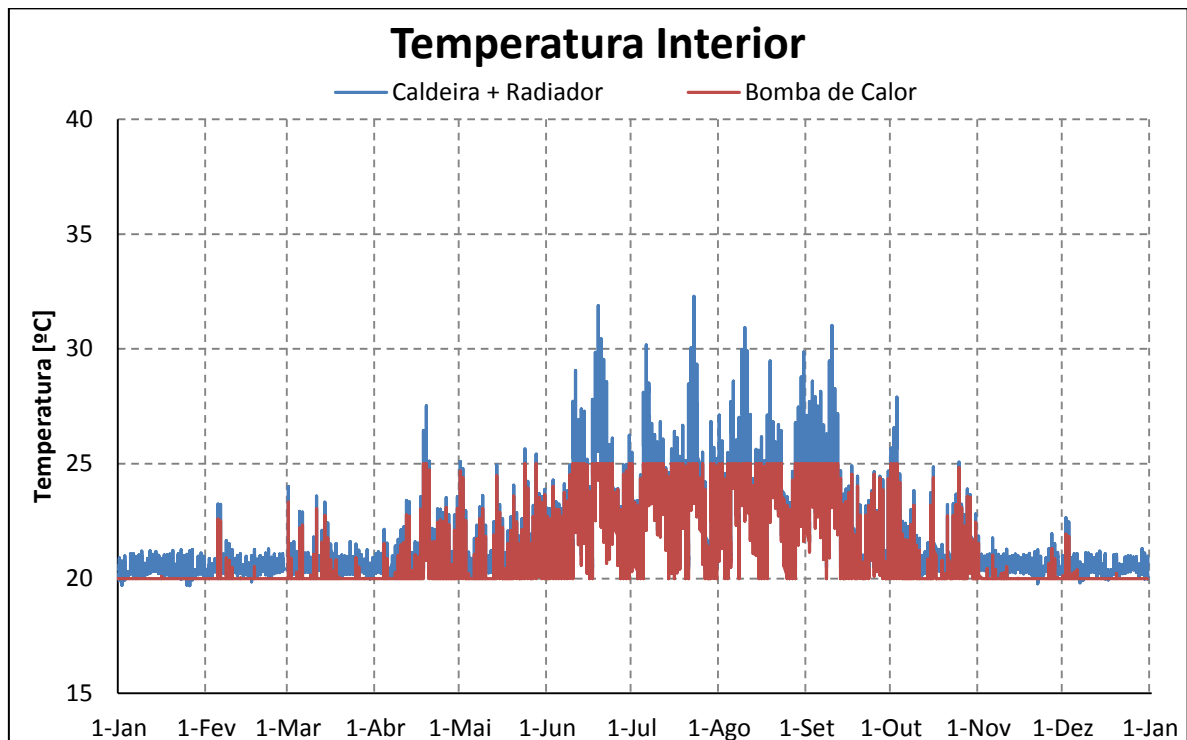


Figura 63 – Comparação da Temperatura interior com os 2 equipamentos para o Cenário B

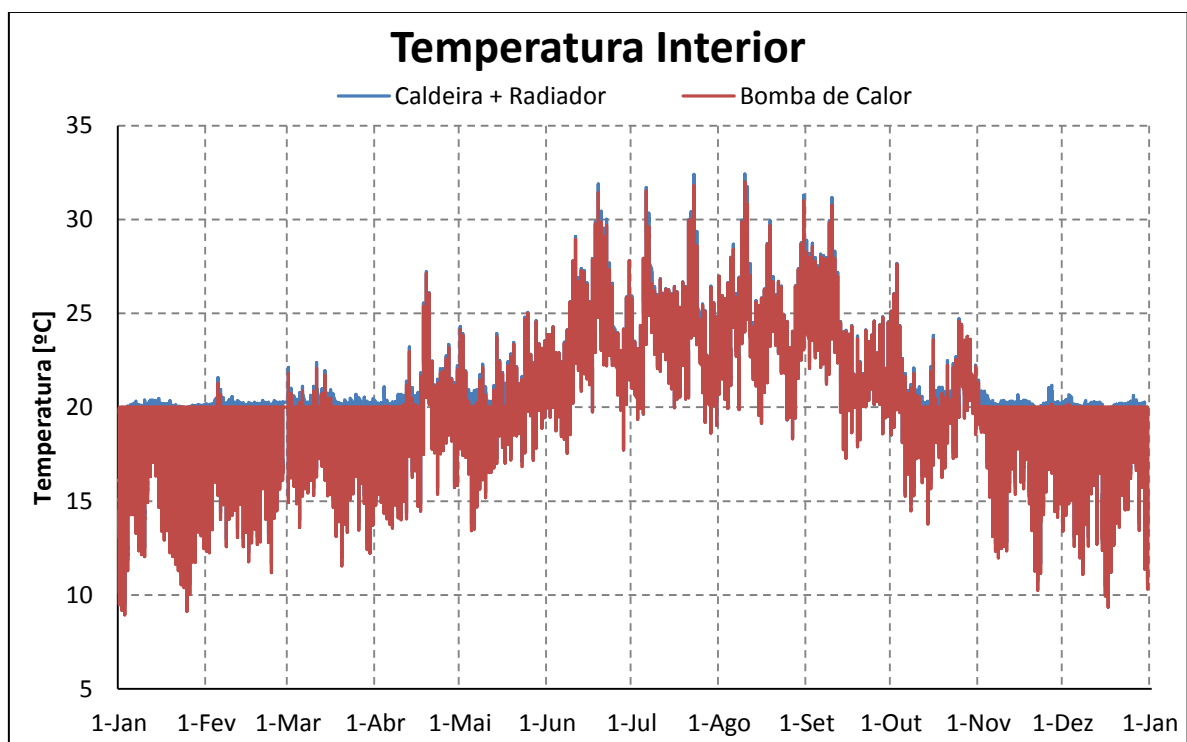


Figura 64 – Comparação da Temperatura interior com os 2 equipamentos para o Cenário C

De seguida é apresentada a Tabela 20 com os respetivos consumos energéticos para cada equipamento, assim como as necessidades energéticas para cada caso. É também mostrado a potência para cada equipamento, assim como os respetivos *CoP*.

Tabela 20 – Comparação para situação de aquecimento

	Cenário A		Cenário B		Cenário C	
	Bomba	Caldeira	Bomba	Caldeira	Bomba	Caldeira
	de	+	de	+	de	+
	Calor	Radiador	Calor	Radiador	Calor	Radiador
CoP	4	0,90	4	0,90	4	0,90
Potência útil (KW)	1,6	1,7	1,8	2,0	2,9	3,2
Energia útil (kWh)	1191,63	1262,15	2891,63	3421,19	1058,78	1336,36
Energia final (kWh)	297,91	1402,39	722,91	3801,33	264,70	1484,84
Energia Primária (Kgep)	86,39	120,61	209,64	326,91	76,76	127,70

Através da análise da Tabela 20, conclui-se que o melhor equipamento para o período de aquecimento seria a Bomba de Calor, uma vez que os consumos energéticos deste equipamento são inferiores, em todos os cenários, aos consumos do equipamento Caldeira + Radiador. Ambos os equipamentos apresentam bons resultados a nível de temperatura de conforto interior, contudo, o sistema Bomba de Calor apresenta um consumo mais económico, o que o torna uma melhor opção de entre os dois.

4.4. SÍNTESE DE RESULTADOS DE TODAS AS SIMULAÇÕES

Após ter efetuado as simulações detalhadas do Cenário A para a cidade do Porto, para os 2 equipamentos, no subcapítulo anterior, com uma descrição pormenorizada dos resultados obtidos, segue-se neste capítulo a apresentação dos resultados para os restantes cenários definidos anteriormente.

Numa primeira fase, vai ser apresentado uma série de gráficos referente às temperaturas interiores da habitação para cada cidade para o Cenário A, sem e com recurso ao equipamento Bomba de Calor (Chiller + Split).

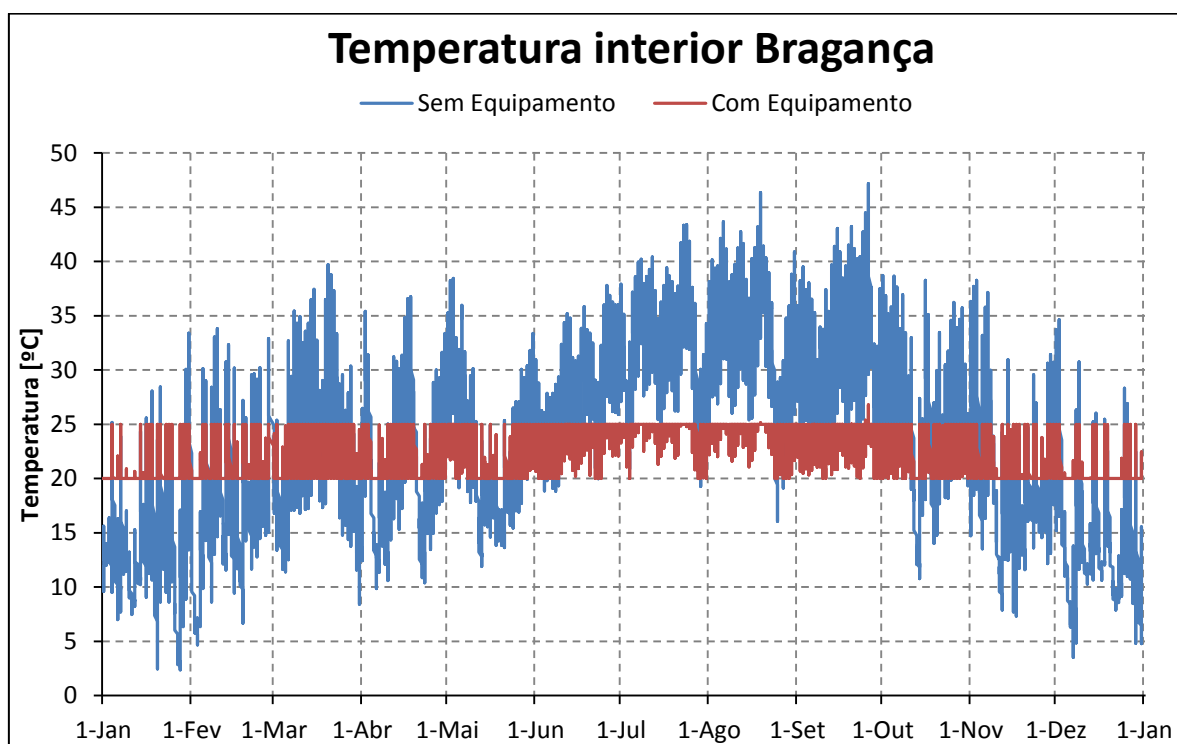


Figura 65 – Temperatura interior em Bragança sem e com Ar Condicionado

Na Figura 56 está representada a temperatura interior da habitação sem recurso a qualquer tipo de equipamentos, a azul, e a temperatura interior da habitação com recurso a Ar Condicionado (Chiller) + Split, a vermelho, para a cidade de Bragança. Analisando a temperatura interior sem equipamentos, podemos ver que existe uma grande amplitude térmica em termos de temperatura, no Inverno as temperaturas chegam a descer os 5°C, e no Verão atingem valores superiores a 45°C. Mesmo durante o período de aquecimento, existem alturas, por exemplo no mês de Março, em que as temperaturas mais elevadas chegam a atingir os 40°C e as mais baixas cerca de 8°C, o que faz com que o equipamento tenha que funcionar com a função de arrefecimento praticamente o ano inteiro. Em termos de função de aquecimento, existem momentos em que ainda é utilizada mesmo no período de arrefecimento, contudo, nos meses compreendidos entre Junho e Setembro (inclusive) esta função praticamente não é utilizada. Se não houvesse utilização do equipamento de Ar Condicionado para esta habitação na cidade de Bragança, as temperaturas interiores que se verificavam eram totalmente fora dos limites de conforto, o que tornava a sua utilização muito desagradável.

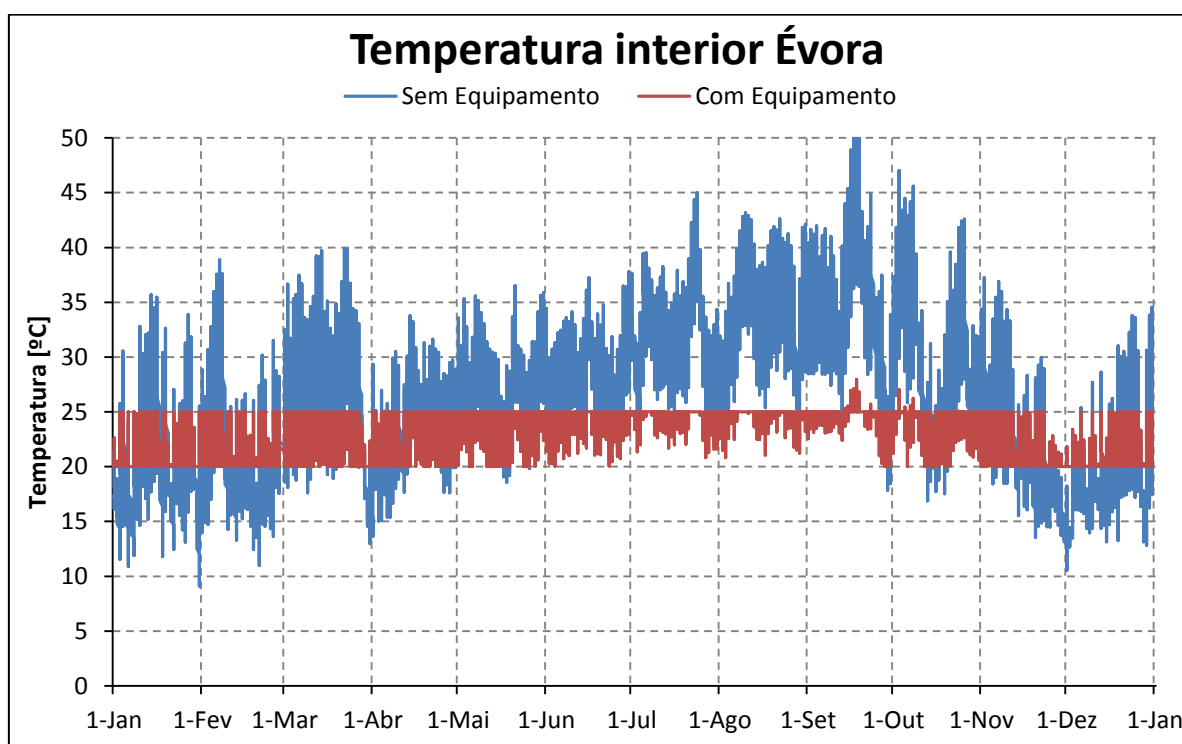


Figura 66 – Temperatura interior em Évora sem e com Ar Condicionado

No gráfico da figura anterior (Figura 57) podemos observar como varia a temperatura interior da habitação na cidade de Évora, sem e com recurso ao sistema Ar Condicionado (Chiller) + Split. De todas as cidades em análise, Évora é a que apresenta os registos de temperatura mais elevada, ultrapassando os 50°C no mês de Setembro. A função de aquecimento do sistema de climatização praticamente não é utilizada entre os meses de Maio a Setembro (inclusive), uma vez que as temperaturas no interior da habitação que se verificam neste período, sem a utilização de equipamentos, são bastante elevadas, estando quase sempre acima dos 20°C, e só quando a temperatura desce abaixo de 20°C é que a função de aquecimento do sistema de climatização entra em funcionamento. Quanto à função de arrefecimento, esta é solicitada durante todo o ano, uma vez que a temperatura interior da habitação na cidade de Évora, sem sistema de climatização, é sempre bastante elevada, sendo a temperatura mais baixa registada em todo o ano cerca de 10°C, contudo, as temperaturas mesmo no período de aquecimento, atingem valores na ordem dos 35°C, e em alguns casos, até chegam a ultrapassar os 40°C, o que demonstra que esta cidade possui uma amplitude térmica considerável, daí a utilização da função de arrefecimento durante o ano inteiro.

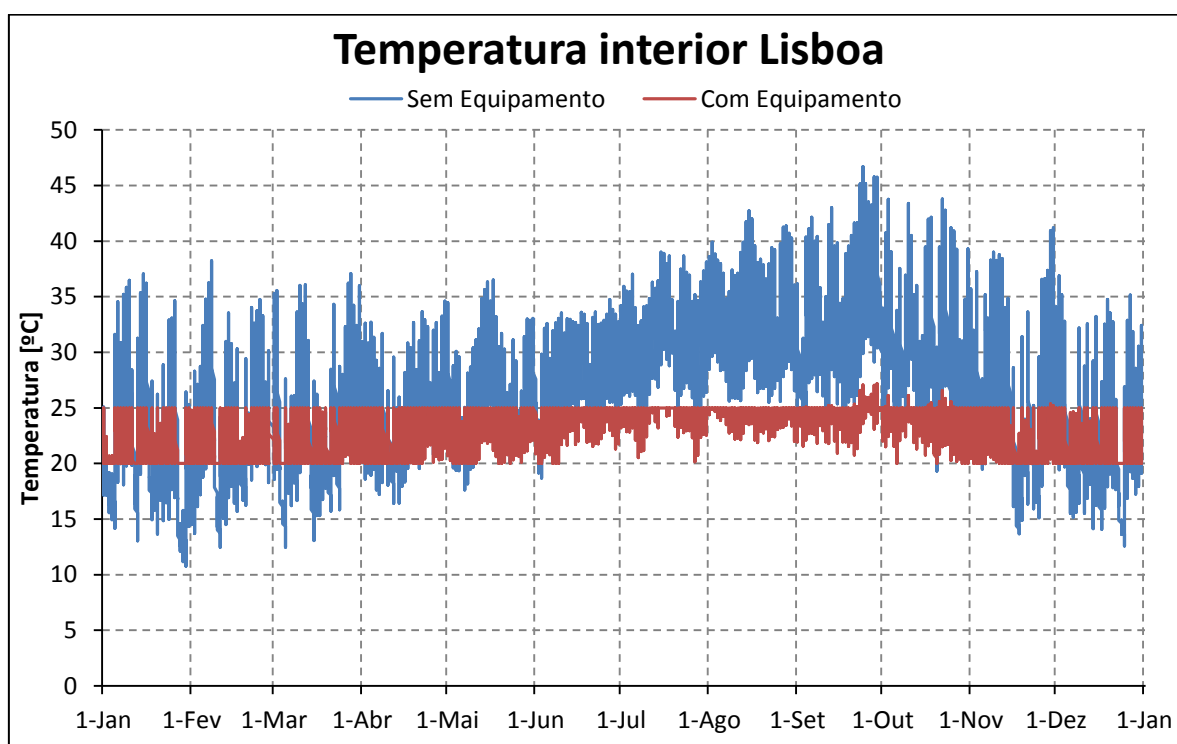


Figura 67 – Temperatura interior em Lisboa sem e com Ar Condicionado

Agora vamos analisar a temperatura interior para uma habitação localizada na cidade de Lisboa, capital portuguesa. Como podemos observar na Figura 58, a temperatura interior da habitação na cidade de Lisboa, sem recurso a qualquer tipo de equipamentos, é sempre bastante elevada, mesmo no período de aquecimento, ultrapassando todos os meses a barreira dos 35°C. Isto torna necessário a utilização do sistema de climatização com função de arrefecimento durante o ano inteiro, pois se este apenas fosse utilizado no período de arrefecimento, iriam haver alturas em que a temperatura interior atingia os 35°C no período de aquecimento, que já é um valor muito elevado e que excede os limites da temperatura de conforto. O sistema de climatização com função de aquecimento quase não é utilizado entre os meses de Junho e Outubro (inclusive), pois neste período as temperaturas que se verificam no interior da habitação, sem recurso ao sistema de climatização, situam-se sempre acima dos 20°C, exceto em uma altura no início do mês de Junho e outra no mês de Outubro. Devido às elevadas temperaturas que se verificam nos meses de Setembro e Outubro, existem momentos em que a temperatura ultrapassa o limite do *setpoint*, que está definido para manter a temperatura abaixo dos 25°C.

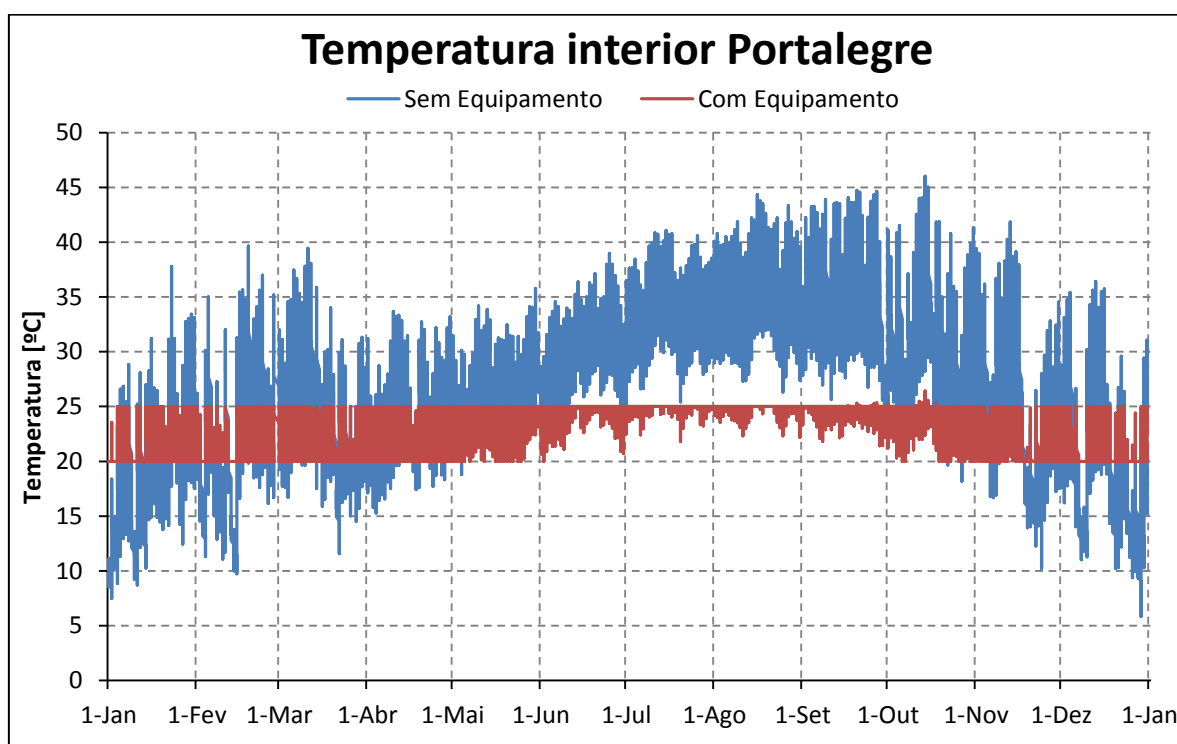


Figura 68 – Temperatura interior em Portalegre sem e com Ar Condicionado

Na Figura 59 estão representadas as temperaturas interiores para uma habitação na cidade de Portalegre sem recurso a qualquer tipo de equipamento, a azul, e com recurso a Ar Condicionado (Chiller) + Split. No período de aquecimento, sem qualquer tipo de equipamento de climatização, a temperatura interior quase que chega a atingir os 5°C, um valor muito baixo e bastante longe das temperaturas limite de conforto. Contudo, mesmo nesse período de aquecimento, por vezes as temperaturas mais altas chegam a atingir os 40°C, pelo que o sistema de climatização com função de arrefecimento tem necessariamente que funcionar durante o ano inteiro. Durante os meses de Maio até Outubro (inclusive) a função de aquecimento praticamente não é utilizada, salvo raras exceções, como as que acontecem no início do mês de Maio e no fim do mês de Outubro. O sistema de climatização é bastante eficaz em manter a temperatura dentro dos valores definidos para o *setpoint*, que se situam entre os 20°C e os 25°C, exceto raras exceções, que acontecem nos meses de Setembro e Outubro, em que as temperaturas atingem valores mais elevados, contudo, mesmo quando isso acontece, essas temperaturas encontram-se dentro dos limites de conforto, pelo que não é nada de preocupante.

Após ter realizado esta descrição detalhada do comportamento do sistema Ar Condicionado (Chiller) + Split em todos os cenários definidos anteriormente (a descrição relativa à cidade do Porto encontra-se no subcapítulo 4.3.), vou agora apresentar os resultados obtidos para o número de horas em que as temperaturas excederam os limites definidos inicialmente no *setpoint*.

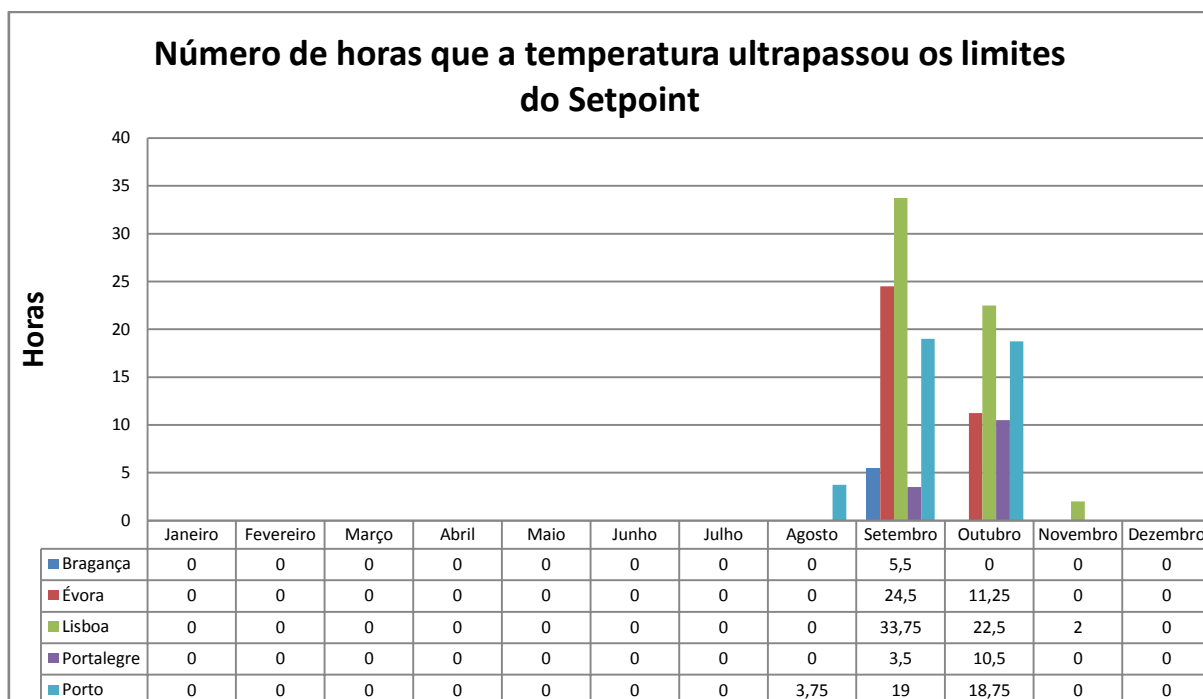


Figura 69 – Número de horas que a temperatura ultrapassou os limites do Setpoint

Na figura anterior (Figura 69) está representado graficamente o número de horas em que a temperatura excedeu os limites indicados no *setpoint*, limites estes que estavam definidos para que a temperatura interior pudesse variar apenas entre os 20°C e os 25°C. A cidade onde estes limites foram mais excedidos foi a cidade de Lisboa, onde se verificou que os limites foram ultrapassados durante 56 horas e 15 minutos. A cidade em que os limites foram menos excedidos, foi na cidade de Bragança, onde estes estiveram fora dos limites durante 5 horas e 30 minutos. Na cidade de Évora, o limite foi ultrapassado durante 35 horas e 45 minutos, para a cidade de Portalegre foi durante 14 horas, e para a cidade do Porto esta situação verificou-se durante 41 horas e 30 minutos. Na soma global das cidades, mês em que existiram mais desvios dos limites foi no mês de Setembro com 86 horas e 15 minutos, com destaque também para o mês de Outubro onde se verificaram desvios durante 63 horas, e o mês onde isso se verificou menos foi em Agosto com 3 horas e 45 minutos.

Todos estes casos se verificaram para a situação em que foi excedido o limite superior do *setpoint*, ou seja, sempre que o limite foi excedido foi devido a uma temperatura interior da habitação superior a 25°C.

Relativamente ao número de horas de desconforto, em todas as cidades, para este equipamento, se verificou que não existia qualquer hora em que a temperatura interior da habitação não se encontrava dentro dos limites de conforto definidos.

Nas tabelas que se seguem, são apresentados os resultados de todas as simulações realizadas. Estas estão organizadas por cenários, ou seja, inicialmente apresentam-se as tabelas de energia relativas ao Cenário A, seguidas das tabelas de temperatura referentes ao Cenário A também, posteriormente apresentam-se as tabelas de energia e temperatura relativamente ao Cenário B e por fim as tabelas referentes a energia e temperatura do Cenário C. Para o período de aquecimento definiu-se o mês de Janeiro como mês de referência, uma vez que este mês tende a ser onde as temperaturas costumam ser mais severas, e para mês de referência do período de arrefecimento definiu-se o mês de Agosto, também por ser neste mês que as temperaturas no período de arrefecimento são mais severas.

Tabela 21 – Cenário A - Aquecimento Ar Condicionado (Chiller) + Split

Cidade	Potência [KW]	Energia Anual			Energia Janeiro		
		Primária [kgep]	Final [KWh]	Útil [KWh]	Primária [kgep]	Final [KWh]	Útil [KWh]
Bragança	2,4	176,565	608,845	2435,37	43,418	149,717	598,869
Évora	1,6	66,631	229,763	919,04	17,205	59,329	237,315
Lisboa	1,2	47,350	163,276	653,10	13,318	45,923	183,691
Portalegre	1,8	80,340	277,035	1108,13	21,856	75,366	301,464
Porto	1,6	86,3934	297,908	1191,63	21,932	75,626	302,503

Tabela 22 – Cenário A - Aquecimento Caldeira + Radiador

Cidade	Potência [KW]	Energia Anual			Energia Janeiro		
		Primária [kgep]	Final [KWh]	Útil [KWh]	Primária [kgep]	Final [KWh]	Útil [KWh]
Bragança	2,6	246,832	2870,142	2583,13	62,671	728,734	655,861
Évora	1,8	91,632	1065,492	958,94	23,565	274,006	246,605
Lisboa	1,3	62,633	728,2879	655,46	18,067	210,083	189,074
Portalegre	2,1	105,959	1232,077	1108,87	30,582	355,607	320,047
Porto	1,7	120,606	1402,389	1262,15	31,919	371,068	333,961

Tabela 23 – Cenário A - Arrefecimento Ar Condicionado (Chiller) + Split

Cidade	Potência [KW]	Energia Anual			Energia Agosto		
		Primária [kgep]	Final [KWh]	Útil [KWh]	Primária [kgep]	Final [KWh]	Útil [KWh]
Bragança	3,8	315,470	1087,826	3263,48	61,102	210,698	632,094
Évora	3,8	395,181	1362,694	4088,08	67,620	233,173	699,518
Lisboa	3,6	404,696	1395,504	4186,51	65,614	226,257	678,770
Portalegre	3,8	441,645	1522,915	4568,74	76,623	264,218	792,654
Porto	3,2	311,066	1072,642	3217,93	51,181	176,485	529,456

Tabela 24 – Cenário A - Aquecimento Ar Condicionado (Chiller) + Split

Sem Equipamento [°C]							Com Equipamento [°C]					
Anual			Janeiro				Anual			Janeiro		
Cidade	Tmed	Tmáx	Tmin	Tmed	Tmáx	Tmin	Tmed	Tmáx	Tmin	Tmed	Tmáx	Tmin
Bragança	23,28	47,17	2,36	13,24	33,41	2,36	22,42	26,78	20	20,73	25	20
Évora	26,40	51,85	9,10	20,23	35,69	9,10	23,02	27,96	20	21,50	25	20
Lisboa	26,70	46,69	10,78	21,58	37,06	10,78	23,16	27,16	20	21,73	25	20
Portalegre	26,87	46,01	5,85	19,12	37,77	7,47	23,15	26,42	20	21,59	25	20
Porto	24,45	44,68	10,23	18,16	30,26	10,54	22,65	28,09	20	21,17	25	20

Tabela 25 – Cenário A - Aquecimento Caldeira + Radiador

Sem Equipamento [°C]							Com Equipamento [°C]					
Anual			Janeiro				Anual			Janeiro		
Cidade	Tmed	Tmáx	Tmin	Tmed	Tmáx	Tmin	Tmed	Tmáx	Tmin	Tmed	Tmáx	Tmin
Bragança	23,28	47,17	2,36	13,24	33,41	2,36	26,14	47,44	19,80	21,66	36,50	19,80
Évora	26,40	51,85	9,10	20,23	35,69	9,10	27,48	52,06	19,81	23,31	36,87	19,81
Lisboa	26,70	46,69	10,78	21,58	37,06	10,78	27,46	46,93	19,86	23,95	37,63	19,86
Portalegre	26,87	46,01	5,85	19,12	37,77	7,47	28,11	46,27	19,71	23,27	39,01	19,77
Porto	24,45	44,68	10,23	18,16	30,26	10,54	25,83	44,91	19,94	22,32	32,43	19,95

Tabela 26 – Cenário A - Arrefecimento Ar Condicionado (Chiller) + Split

Cidade	Sem Equipamento [°C]						Com Equipamento [°C]					
	Anual			Agosto			Anual			Agosto		
	Tmed	Tmáx	Tmin	Tmed	Tmáx	Tmin	Tmed	Tmáx	Tmin	Tmed	Tmáx	Tmin
Bragança	23,28	47,17	2,36	32,41	46,35	16,05	22,42	26,78	20	24,21	25,13	20
Évora	26,40	51,85	9,10	33,34	43,18	22,53	23,02	27,96	20	24,58	25	20,82
Lisboa	26,70	46,69	10,78	32,67	42,73	25,51	23,16	27,16	20	24,61	25	21,89
Portalegre	26,87	46,01	5,85	34,98	44,35	26,33	23,15	26,42	20	24,82	25	22,18
Porto	24,45	44,68	10,23	30,14	42,34	21,03	22,65	28,09	20	24,21	25,94	20

Tabela 27 – Cenário B - Aquecimento Ar Condicionado (Chiller) + Split

Cidade	Potência [KW]	Energia Anual			Energia Janeiro		
		Primária [kgep]	Final [KWh]	Útil [KWh]	Primária [kgep]	Final [KWh]	Útil [KWh]
Bragança	2,5	332,153	1145,355	4581,420	67,711	233,487	933,947
Évora	1,6	183,150	631,552	2526,208	42,206	145,539	582,155
Lisboa	1,3	151,502	522,421	2089,682	34,246	118,089	472,355
Portalegre	1,8	195,906	675,538	2702,150	45,416	156,607	626,430
Porto	1,8	209,643	722,907	2891,630	43,514	150,050	600,199

Tabela 28 – Cenário B - Aquecimento Caldeira + Radiador

Cidade	Potência [KW]	Energia Anual			Energia Janeiro		
		Primária [kgep]	Final [KWh]	Útil [KWh]	Primária [kgep]	Final [KWh]	Útil [KWh]
Bragança	2,7	494,766	5753,096	5177,786	97,099	1129,061	1016,155
Évora	1,8	283,276	3293,903	2964,513	62,523	727,010	654,309
Lisboa	1,5	238,067	2768,224	2491,402	51,650	600,584	540,526
Portalegre	2,0	299,973	3488,054	3139,249	66,442	772,577	695,319
Porto	2,0	326,914	3801,326	3421,193	64,315	747,846	673,062

Tabela 29 – Cenário B - Arrefecimento Ar Condicionado (Chiller) + Split

Cidade	Potência [KW]	Energia Anual			Energia Agosto		
		Primária [kgep]	Final [KWh]	Útil [KWh]	Primária [kgep]	Final [KWh]	Útil [KWh]
Bragança	1,6	49,896	172,054	516,161	17,411	60,037	180,112
Évora	1,8	81,863	282,286	846,859	23,485	80,981	242,944
Lisboa	1,3	65,147	224,646	673,937	20,794	71,702	215,106
Portalegre	1,6	95,505	329,327	987,980	30,482	105,110	315,329
Porto	1,2	22,769	78,514	235,542	6,990	24,102	72,305

Tabela 30 – Cenário B - Aquecimento Ar Condicionado (Chiller) + Split

Sem Equipamento [°C]							Com Equipamento [°C]					
Anual			Janeiro				Anual			Janeiro		
Cidade	Tmed	Tmáx	Tmin	Tmed	Tmáx	Tmin	Tmed	Tmáx	Tmin	Tmed	Tmáx	Tmin
Bragança	16,36	35,95	-1,65	6,98	13,52	-1,65	21,20	25	20	20	20	20
Évora	19,68	38,54	6,51	12,03	16,81	6,51	21,69	25	20	20	20,13	20
Lisboa	19,91	33,49	9,28	13,55	18,93	9,28	21,70	25	20	20,03	21,29	20
Portalegre	19,88	36,05	4,80	11,31	19,11	7,04	21,86	25	20	20,02	22	20
Porto	17,96	32,21	5,58	11,70	17,20	5,58	21,12	25	20	20	20,10	20

Tabela 31 - Cenário B - Aquecimento Caldeira + Radiador

Sem Equipamento [°C]							Com Equipamento [°C]					
Anual			Janeiro				Anual			Janeiro		
Cidade	Tmed	Tmáx	Tmin	Tmed	Tmáx	Tmin	Tmed	Tmáx	Tmin	Tmed	Tmáx	Tmin
Bragança	16,36	35,95	-1,65	6,98	13,52	-1,65	22,17	35,98	19,68	20,28	21,35	19,68
Évora	19,68	38,54	6,51	12,03	16,81	6,51	22,96	38,56	19,74	20,34	21,59	19,88
Lisboa	19,91	33,49	9,28	13,55	18,93	9,28	22,64	33,53	19,75	20,40	21,93	19,75
Portalegre	19,88	36,05	4,80	11,31	19,11	7,04	23,32	36,09	19,75	20,34	22,69	19,81
Porto	17,96	32,21	5,58	11,70	17,20	5,58	21,70	32,29	19,70	20,34	21,26	19,70

Tabela 32 - Cenário B - Arrefecimento Ar Condicionado (Chiller) + Split

Sem Equipamento [°C]							Com Equipamento [°C]					
Anual			Agosto				Anual			Agosto		
Cidade	Tmed	Tmáx	Tmin	Tmed	Tmáx	Tmin	Tmed	Tmáx	Tmin	Tmed	Tmáx	Tmin
Bragança	16,36	35,95	-1,65	25,74	35,61	13,86	21,20	25	20	23,51	25	20
Évora	19,68	38,54	6,51	27,42	35,18	19,63	21,69	25	20	24,14	25	20
Lisboa	19,91	33,49	9,28	26,84	33,49	21,78	21,70	25	20	24,20	25	20,88
Portalegre	19,88	36,05	4,80	29,11	36,05	22,68	21,86	25	20	24,61	25	21,26
Porto	17,96	32,21	5,58	23,78	30,90	17,68	21,12	25	20	23,11	25	20

Tabela 33 – Cenário C - Aquecimento Ar Condicionado (Chiller) + Split

Cidade	Potência [KW]	Energia Anual			Energia Janeiro		
		Primária [kgep]	Final [KWh]	Útil [KWh]	Primária [kgep]	Final [KWh]	Útil [KWh]
Bragança	4,0	131,428	453,202	1812,806	30,011	103,487	413,946
Évora	2,8	65,789	226,859	907,437	17,594	60,670	242,681
Lisboa	2,2	52,777	181,990	727,958	13,681	47,176	188,702
Portalegre	2,8	63,155	217,776	871,102	17,542	60,488	241,953
Porto	2,9	76,762	264,696	1058,784	18,292	63,077	252,308

Tabela 34 - Cenário C - Aquecimento Caldeira + Radiador

Cidade	Potência [KW]	Energia Anual			Energia Janeiro		
		Primária [kgep]	Final [KWh]	Útil [KWh]	Primária [kgep]	Final [KWh]	Útil [KWh]
Bragança	4,5	207,070	2407,793	2167,014	45,185	525,413	472,871
Évora	3,3	108,789	1264,988	1138,489	27,442	319,095	287,185
Lisboa	2,7	89,358	1039,044	935,140	21,895	254,596	229,136
Portalegre	3,2	104,767	1218,218	1096,396	27,365	318,203	286,383
Porto	3,2	127,696	1484,843	1336,359	28,428	330,557	297,502

Tabela 35 - Cenário C - Arrefecimento Ar Condicionado (Chiller) + Split

Cidade	Potência [KW]	Energia Anual			Energia Agosto		
		Primária [kgep]	Final [KWh]	Útil [KWh]	Primária [kgep]	Final [KWh]	Útil [KWh]
Bragança	2,8	29,350	101,207	303,622	10,688	36,855	110,566
Évora	3,4	49,883	172,011	516,032	14,978	51,648	154,944
Lisboa	2,2	35,541	122,557	367,670	12,167	41,955	125,864
Portalegre	3,1	66,191	228,245	684,735	21,274	73,359	220,076
Porto	1,9	10,287	35,474	106,422	3,386	11,676	35,029

Tabela 36 – Cenário C - Aquecimento Ar Condicionado (Chiller) + Split

Sem Equipamento [°C]							Com Equipamento [°C]					
Anual			Janeiro				Anual			Janeiro		
Cidade	Tmed	Tmáx	Tmin	Tmed	Tmáx	Tmin	Tmed	Tmáx	Tmin	Tmed	Tmáx	Tmin
Bragança	16,36	35,95	-1,65	6,98	13,52	-1,65	18,74	34,73	5,18	13,27	20	5,18
Évora	19,68	38,54	6,51	12,03	16,81	6,51	20,76	36,33	9,62	15,81	20	9,62
Lisboa	19,91	33,49	9,28	13,55	18,93	9,28	20,99	32,98	11,71	16,63	20,05	11,71
Portalegre	19,88	36,05	4,80	11,31	19,11	7,04	20,69	34,93	9,28	15,21	20,03	9,87
Porto	17,96	32,21	5,58	11,70	17,20	5,58	19,66	31,99	8,94	15,72	20	8,94

Tabela 37 - Cenário C - Aquecimento Caldeira + Radiador

Sem Equipamento [°C]							Com Equipamento [°C]					
Anual			Janeiro				Anual			Janeiro		
Cidade	Tmed	Tmáx	Tmin	Tmed	Tmáx	Tmin	Tmed	Tmáx	Tmin	Tmed	Tmáx	Tmin
Bragança	16,36	35,95	-1,65	6,98	13,52	-1,65	19,36	36,16	5,91	13,70	20,47	5,91
Évora	19,68	38,54	6,51	12,03	16,81	6,51	21,51	38,61	10,19	16,15	20,67	10,19
Lisboa	19,91	33,49	9,28	13,55	18,93	9,28	21,50	33,83	12,18	16,95	20,74	12,18
Portalegre	19,88	36,05	4,80	11,31	19,11	7,04	21,64	36,58	9,78	15,56	20,84	10,31
Porto	17,96	32,21	5,58	11,70	17,20	5,58	19,98	32,42	9,52	16,07	20,47	3,52

Tabela 38 - Cenário C - Arrefecimento Ar Condicionado (Chiller) + Split

Sem Equipamento [°C]							Com Equipamento [°C]					
Anual			Agosto				Anual			Agosto		
Cidade	Tmed	Tmáx	Tmin	Tmed	Tmáx	Tmin	Tmed	Tmáx	Tmin	Tmed	Tmáx	Tmin
Bragança	16,36	35,95	-1,65	25,74	35,61	13,86	18,74	34,73	5,18	24,83	34,73	15,84
Évora	19,68	38,54	6,51	27,42	35,18	19,63	20,76	36,33	9,62	26,01	35,12	19,83
Lisboa	19,91	33,49	9,28	26,84	33,49	21,78	20,99	32,98	11,71	25,98	32,65	21,52
Portalegre	19,88	36,05	4,80	29,11	36,05	22,68	20,69	34,93	9,28	26,71	34,93	22,69
Porto	17,96	32,21	5,58	23,78	30,90	17,68	19,66	31,99	8,94	23,96	31,99	18,33

Após terem sido apresentadas as tabelas com os resultados obtidos para cada cidade, para os 3 cenários definidos, de seguida apresentam-se graficamente os resultados obtidos em termos de energia (primária, final e útil) para os 3 cenários, para todas as cidades.

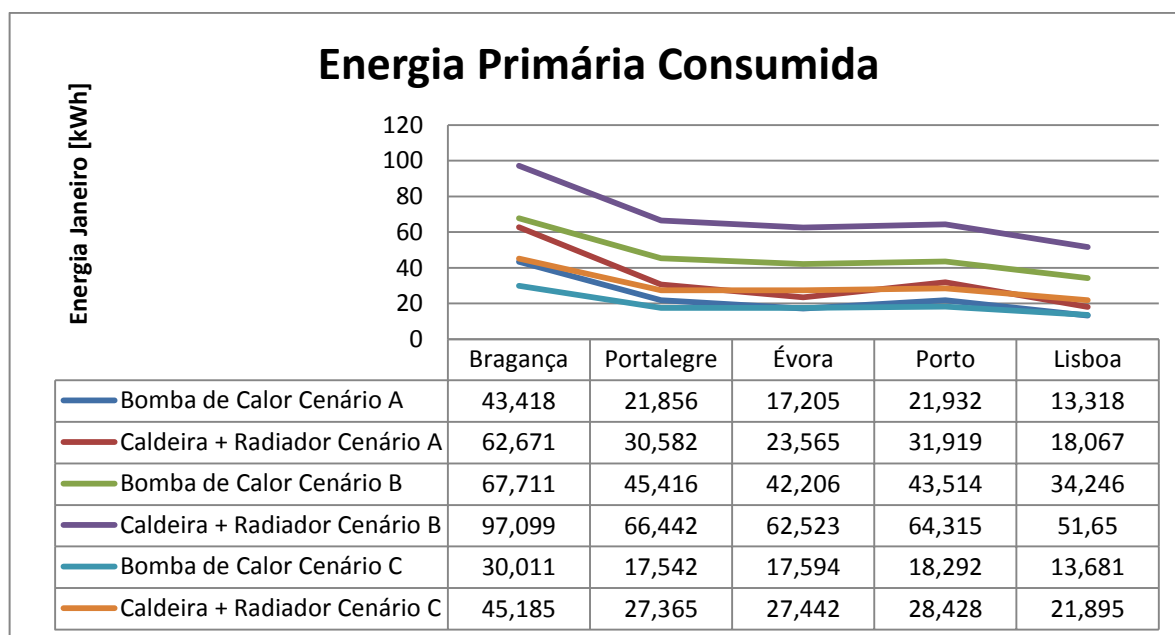


Figura 70 – Síntese de resultados de energia primária

Na figura anterior apresenta-se graficamente os resultados relativos ao consumo de energia primária por parte dos 2 equipamentos, para todas as cidades e para todos os cenários. Esta energia é o recurso energético que se encontra disponível na natureza. Analisando o gráfico, constata-se que os equipamentos que consomem mais energia primária, para todas as cidades, são os equipamentos respetivos ao Cenário B. Relativamente à cidade de Bragança, esta apresenta uma grande diferença de consumo relativamente à Bomba de Calor do Cenário A e à Bomba de Calor do Cenário C, situação que não se verifica nas outras cidades, em que estes dois equipamentos possuem consumos de energia primária semelhantes.

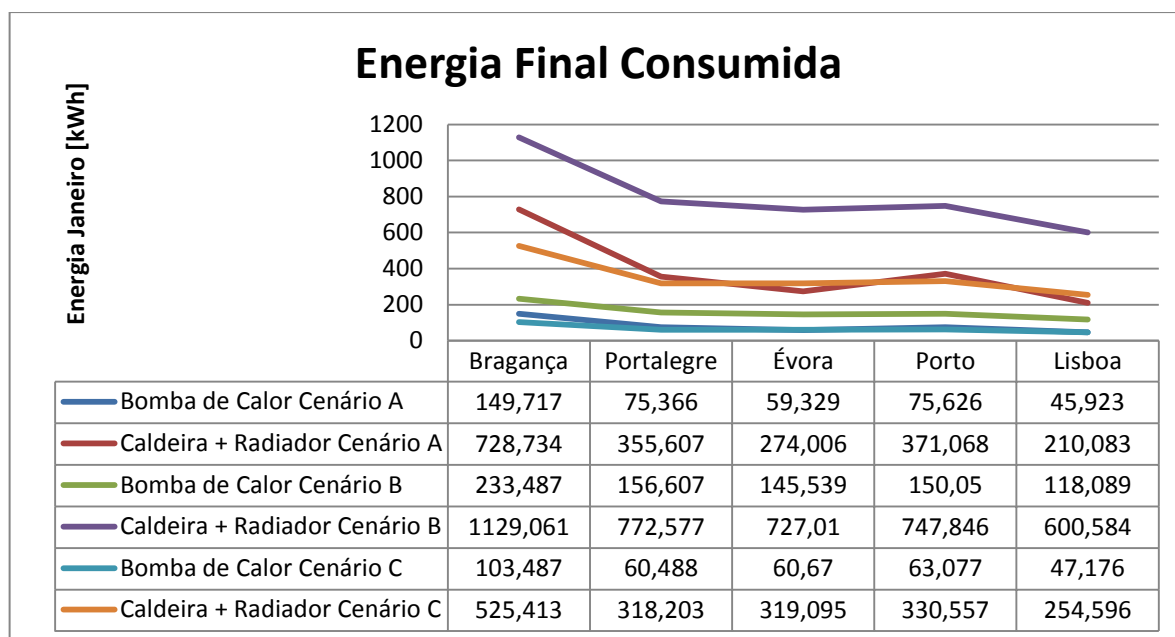


Figura 71 – Síntese de resultados de energia final

Na Figura 71 está representada a síntese de resultados relativos ao consumo de energia final. A energia final é a energia disponibilizada ao utilizador sob diferentes formas (eletricidade, gás natural, butano, etc.). Analisando esta figura verifica-se que os 3 equipamentos que têm consumos mais elevados são todos respetivos à Caldeira + Radiador para os diferentes cenários. O equipamento Bomba de Calor é o que apresenta melhores resultados em termos de energia útil consumida.

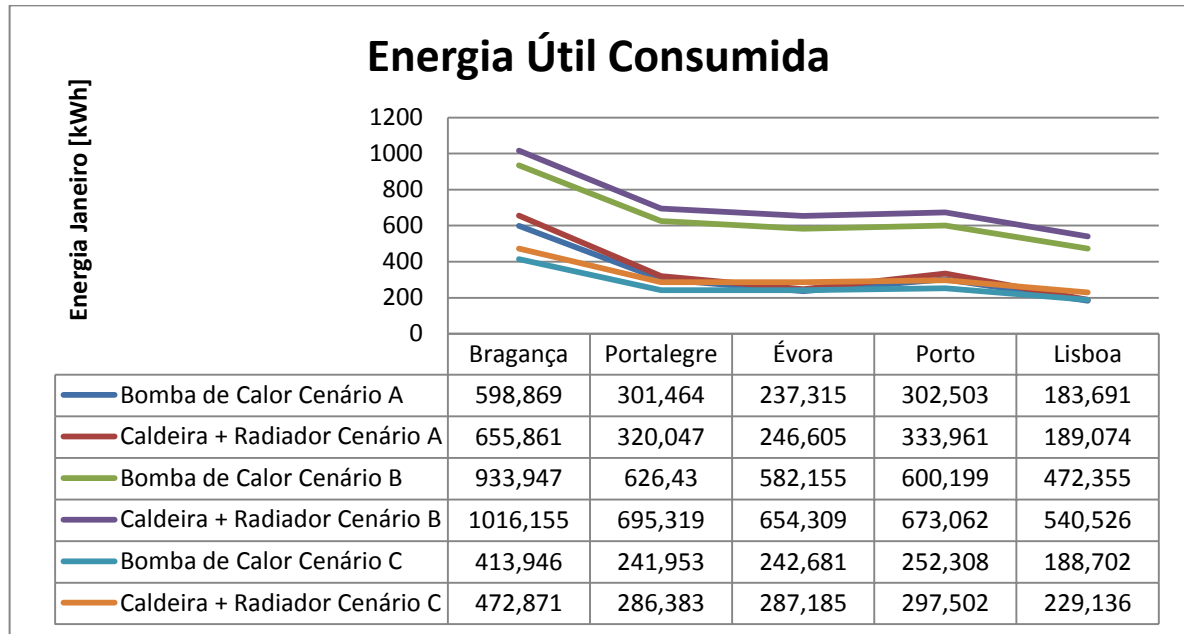


Figura 72 – Síntese de resultados de energia útil

Analisando a Figura 72, relativa à energia útil, que corresponde à energia-calor fornecida ou retirada de um espaço interior e é independente da forma da energia final, o cenário onde o consumo é mais elevado é o Cenário B, para ambos os equipamentos. Para as cidades de Bragança, Portalegre e Porto o cenário mais económico é o Cenário C, e para as cidades de Évora e Lisboa, o cenário em que os consumos de energia útil são mais baixos é para o Cenário A.

4.5. ANÁLISE FINANCEIRA

Para efetuar corretamente a análise de custo de cada um dos equipamentos, primeiro é necessário converter os consumos de gás natural, pois estes vêm expressos em kWh, e é necessário que sejam expressos em m³.

Para se realizar essa conversão, é necessário aplicar a seguinte equação:

$$m_{comb} = \frac{ENERGIA\ FINAL \cdot 3600}{PCI} \quad (7)$$

PCI = PODER CALORÍFICO INFERIOR DO GÁS NATURAL = 38416 $\left[\frac{KJ}{Kg} \right]$

m_{comb} = MASSA DE COMBUSTÍVEL [KG]

$ENERGIA\ FINAL$ = ENERGIA CONSUMIDA PELOS EQUIPAMENTOS [kWh]

A Tabela 39 apresenta os valores obtidos para o consumo de gás natural anual, para todas as cidades e todos os cenários. Os consumos anuais de gás natural na tabela seguinte são apresentados em kWh e em Kg.

Tabela 39 – Consumo anual de gás natural em kWh e Kg

	Cenário A		Cenário B		Cenário C	
Cidade	kWh/ano	Kg/ano	kWh/ano	Kg/ano	kWh/ano	Kg/ano
Bragança	2870	269	5753	539	2408	226
Évora	1065	100	3294	309	1265	119
Lisboa	728	68	2768	259	1039	97
Portalegre	1232	115	3488	327	1218	114
Porto	1402	131	3801	356	1485	139

Sabendo que a densidade do gás natural é aproximadamente 0,7 Kg/m³ [21], apresenta-se de seguida a Tabela 40, com os resultados finais do consumo anual de gás natural, expressos em m³.

Tabela 40 - Consumo anual de gás natural em kWh e m³

	Cenário A		Cenário B		Cenário C	
Cidade	Kg/ano	m ³ /ano	Kg/ano	m ³ /ano	Kg/ano	m ³ /ano
Bragança	269	384	539	770	226	323
Évora	100	143	309	441	119	170
Lisboa	68	97	259	370	97	139
Portalegre	115	164	327	467	114	163
Porto	131	187	356	509	139	199

Para o sistema Bomba de Calor, definiu-se uma taxa de consumo de eletricidade na ordem dos 0,13€/kWh com base na tabela de preços definida pela EDP [22], e para o sistema Caldeira + Radiador, foram utilizados os valores definidos pela EDP Gás [23]:

- Consumos anuais entre 0 e 220 m³: 0,0736 €/kWh
- Consumos anuais entre 221 e 500 m³: 0,0660 €/kWh
- Consumos anuais entre 501 e 1000 m³: 0,0625€/kWh

A Tabela 41 apresenta os custos associados aos consumos anuais de aquecimento de eletricidade para o equipamento Bomba de Calor, para as várias cidades e todos os cenários. Na Tabela 42 estão apresentados os custos associados aos consumos anuais de aquecimento de gás natural para o equipamento Caldeira + Radiador, também para as várias cidades e todos os cenários. A Tabela 43 apresenta os custos associados aos consumos anuais de arrefecimento de eletricidade do equipamento Bomba de Calor.

Tabela 41 – Custos anuais período de aquecimento Bomba de Calor

Cidade	Cenário A		Cenário B		Cenário C	
	kWh/ano	€	kWh/ano	€	kWh/ano	€
Bragança	609	79	1145	149	453	59
Évora	230	30	632	82	227	29
Lisboa	163	21	522	68	182	24
Portalegre	277	36	676	88	218	28
Porto	298	39	723	94	265	34

Tabela 42 – Custos anuais período de aquecimento Caldeira + Radiador

Cidade	Cenário A			Cenário B			Cenário C		
	m³/ano	kWh/ano	€	m³/ano	kWh/ano	€	m³/ano	kWh/ano	€
Bragança	384	2870	189	770	5753	360	323	2408	159
Évora	143	1065	78	441	3294	217	170	1265	93
Lisboa	97	728	54	370	2768	183	139	1039	76
Portalegre	164	1232	81	467	3488	230	163	1218	90
Porto	187	1402	103	509	3801	238	199	1485	109

Tabela 43 – Consumos anuais período de arrefecimento Bomba de Calor

Cidade	Cenário A		Cenário B		Cenário C	
	kWh/ano	€	kWh/ano	€	kWh/ano	€
Bragança	1088	141	172	22	101	13
Évora	1363	177	282	37	172	22
Lisboa	1396	181	225	29	123	16
Portalegre	1523	198	329	43	228	30
Porto	1073	139	79	10	35	5

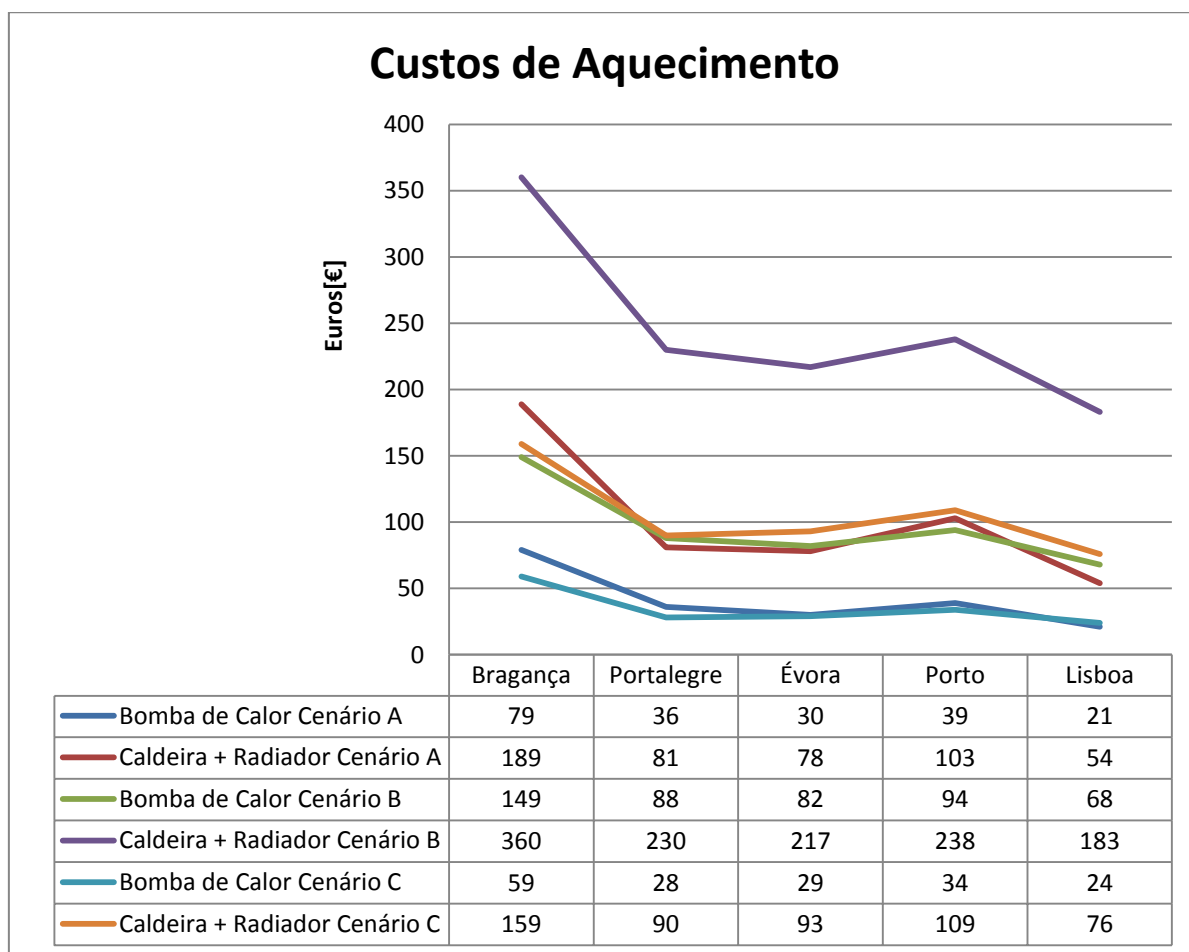


Figura 73 – Custos de aquecimento para os dois sistemas

Na Figura 73 está representado o gráfico dos custos anuais de ambos os equipamentos, para todas as cidades alvo de análise, e para os 3 cenários definidos. A Bomba de Calor do Cenário A e do Cenário C são as que apresentam mais destacadas com um custo mais económico face às restantes situações. Relativamente ao sistema Caldeira + Radiador, o que apresenta melhores resultados é o sistema correspondente ao Cenário A, exceto para a cidade de Bragança, em que o Cenário C se torna mais económico. O sistema Caldeira + Radiador do Cenário B é o que apresenta custos mais elevados em comparação com todos os outros equipamentos dos restantes cenários.

5

CONCLUSÕES

5.1. CONCLUSÕES GERAIS

Numa primeira fase este trabalho foi realizado com o intuito de explicar em que consistia o programa DesignBuilder e como se utiliza de modo a simular aquilo que se pretende, visto que é um programa relativamente recente e do qual ainda não existe muita informação disponível. Após a realização deste estudo conclui-se que este programa é bastante intuitivo, com uma interface atrativa para o utilizador, contudo, devido à existência de pouca informação sobre ele, por vezes algumas questões que surgiram ao longo das simulações demoraram um pouco mais a ser resolvidas.

Nesta dissertação foram definidos vários cenários possíveis para analisar o comportamento térmico do modelo de habitação em estudo, e para analisar o comportamento de dois equipamentos AVAC. Os cenários foram bastante úteis de modo a compreender qual o equipamento mais adequado a cada uma das cidades em análise.

Esta análise de soluções de aquecimento e arrefecimento de edifícios para diferentes zonas climáticas portuguesas foi realizada pelo que se destacam as principais conclusões obtidas ao longo deste trabalho:

- Esta dissertação permitiu adquirir conhecimentos sobre a utilização do programa DesignBuilder;
- Através do processo de implementação do BEStest 900 no DesignBuilder verificou-se que este modelo foi introduzido de forma adequada, uma vez que os resultados obtidos estavam dentro do intervalo de resultados esperados.
- Foram utilizados os valores de COP definidos no RCCTE (Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios) para os equipamentos em análise, se tivesse sido efetuada uma modulação detalhada, seriam encontrados valores de COP variáveis que podiam alterar os resultados obtidos
- Nas simulações verificou-se que os ganhos solares têm um papel determinante nas características do ambiente anterior, pelo que o seu controlo é fundamental de modo a otimizar o funcionamento dos sistemas AVAC a instalar na habitação.
- Devido à utilização de cenários sem e com proteção solar, conclui-se que o seu uso deve ser controlado de acordo com o período (aquecimento ou arrefecimento) do ano. Para o período de aquecimento, a proteção solar deve estar desativada, de modo a existirem ganhos solares através dos envidraçados, aumentando a temperatura interior ambiente e reduzindo a utilização dos sistemas AVAC. No período de arrefecimento, a proteção solar deve estar ativada, de modo a reduzir os ganhos solares através dos envidraçados, reduzindo a temperatura interior e reduzindo a utilização da Bomba de Calor.

- Na energia primária consumida em cada cidade nos vários cenários, os valores obtidos para cada equipamento aproximam-se mais, não existindo uma clara distinção entre Bomba de Calor e Caldeira + Radiador.
- Na comparação da energia final consumida por cada equipamento nas várias situações, existe uma distinção perceptível a nível de equipamentos, verificando-se que o sistema Caldeira + Radiador é o equipamento que consome mais energia final, pois este é o que apresenta um nível de consumo mais elevado em todas as cidades, para todos os cenários analisados, comparativamente ao sistema Bomba de Calor.
- Relativamente à energia útil consumida, verifica-se que existe uma linearidade entre o consumo de ambos os equipamentos dentro do mesmo cenário. O Cenário B é o que se destaca mais pelos elevados consumos, nos Cenários A e C existe uma semelhança no consumo a nível de todas as cidades exceto Bragança, onde se regista uma diferença mais significativa a nível de cenários.
- A Bomba de Calor é o sistema que apresenta melhores resultados tanto a nível de conforto como a nível económico, para todas as cidades analisadas. Além de ser mais económica, esta pode funcionar também no período de arrefecimento, com o intuito de reduzir a temperatura interior da habitação, que o sistema Caldeira + Radiador não é capaz de fazer, uma vez que apenas funciona de modo a aquecer a temperatura interior.

5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Para continuidade do trabalho realizado ao longo desta dissertação, seria interessante o seguinte:

- Análise de outros sistemas AVAC existentes no DesignBuilder
- Otimização dos materiais de construção utilizados no modelo de habitação
- Implementação de um horário para o sombreamento, mais de acordo com a realidade
- Aplicação dos sistemas AVAC a habitações de várias tipologias diferentes (T0, T1, T2, T3, etc.) ou a várias divisões diferentes (Cozinha, sala de estar, quartos, etc.)
- Implementação de sistema de ventilação
- Análise de sistemas de ventilação (natural, mecânica e mista) para edifícios

BIBLIOGRAFIA

- [1] DesignBuilder: <http://www.designbuilder.co.uk/>. Fevereiro a Junho 2013
- [2] EnergyPlus: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>.
- [3] Ibarra, D., Reinhart, C. *DesignBuilder Tutorials*. Harvard University, 2009
- [4] ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. *ANSI/ASHRAE Standard 140-2007 Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests*. Dezembro 2011.
- [5] Google SketchUp: <http://www.sketchup.com/intl/en/product/gsu.html>. Março 2013
- [6] BLAST: <http://blast.ncbi.nlm.nih.gov/>. Abril 2013
- [7] DOE-2: <http://doe2.com/>. Abril 2013
- [8] EnergyPlus™. *EnergyPlus Engineering Reference – The Reference to EnergyPlus Calculations*. Maio 2012
- [9] Gomes, K., *Validação da Modelação de um Edifício de Habitação com o Programa EnergyPlus por Comparação com Medições “In Situ”*. Janeiro 2010
- [10] Ramos, N.M.M., *Aulas Teóricas de Instalação de Edifícios (Aquecimento/Arrefecimento e Ventilação)* FEUP
- [11] <http://images.izideal.com/img/product/14964294/1/pt/vulcano-lifestar-estanque-zw-24-2-dh-ae23-nat.jpeg> Abril 2013
- [12] Frota, A.B., Schiffer, S.R., *Manual do Conforto Térmico*. Pág.128, 2001
- [13] <http://www.riorenovavel.com/efficient-design/ventilation-airflow> Abril 2013
- [14] <http://www.eco.edp.pt/pt/particulares/conhecer/equipamentos-eficientes/climatizacao/ar-condicionado-bomba-de-calor/> Abril 2013
- [15] RCCTE, *Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios*, Decreto de Lei nº80, de 4 de Abril de 2006, Porto Editora, Porto, 2006.
- [16] <http://pt.wikipedia.org/wiki/Convecção> Maio 2013
- [17] http://www.sobiologia.com.br/conteudos/oitava_serie/Calor6.php Maio 2013
- [18] http://pt.wikipedia.org/wiki/Irradiação_térmica Maio 2013
- [19] <http://projectofq.blogspot.pt/2010/10/radiacao-electromagnetica.html> Maio 2013
- [20] <http://cienciaefisicanaweb.blogspot.pt/2011/03/termodinamica-primeira-e-segunda-aula.html> Maio 2013
- [21] http://www.engineeringtoolbox.com/gas-density-d_158.html Junho 2013
- [22] <https://energia.edp.pt/particulares/electricidade/casa/tarifarios.aspx> Junho 2013
- [23] <http://www.edpgassu.pt/index.php?id=242> Junho 2013

